

ผลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมบัติ
ของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการผลิตเดกซ์ทริน

EFFECT OF INFRARED HEAT TREATMENT ON PROPERTIES OF
TAPIOCA FLOUR DURING DEXTRIN PRODUCTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-100-067

ผลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมบัติ
ของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการผลิตเดกซ์ทริน

EFFECT OF INFRARED HEAT TREATMENT ON PROPERTIES OF
TAPIOCA FLOUR DURING DEXTRIN PRODUCTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-100-067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF INFRARED HEAT TREATMENT ON PROPERTIES OF TAPIOCA
FLOUR DURING DEXTRIN PRODUCTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-100-067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง
ระหว่างการผลิตเดกซ์ทริน

Thesis Title Effect of Infrared Heat Treatment on Properties of Tapioca Flour during
Dextrin Production

นักศึกษา นายพีรภัทร อุไรเวศ

รหัสประจำตัว 58601294

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ประสันต์ ชุ่มใจหาญ

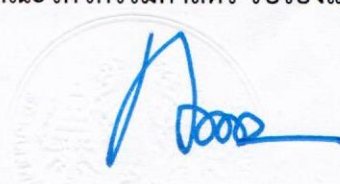
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-100-067

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ	
รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์	
ผศ.ดร.ศจี สุวรรณศรี	
ผศ.ดร.ทรงวุฒิ์ แสงจันทร์	
ผศ.ดร.ประสันต์ ชุ่มใจหาญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.30-11.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าขอรับเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลังระหว่างกระบวนการผลิตเดกซ์ทรีน
นักศึกษา	นายพีรภัทร อุไรเวศ
รหัสประจำตัว	58601294
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ประสันต์ ชุ่มใจหาญ

บทคัดย่อ

เดกซ์ทรีนเป็นแป้งดัดแปรชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้านทั้งการผลิตอาหาร สิ่งทอ กระดาษ กาว เป็นต้น ซึ่งการผลิตเดกซ์ทรีนทำได้โดยการไฮโดรไลซ์แป้งด้วยเอนไซม์กรด หรือการให้ความร้อนแป้งที่อุณหภูมิสูงโดยการได้ประยุกต์ใช้ความร้อนจากการนำและพาความร้อนเป็นหลัก แต่ยังไม่พบงานวิจัยใดที่มีการประยุกต์ใช้หลักการให้ความร้อนกับแป้งมันสำปะหลังเพื่อผลิตเดกซ์ทรีนโดยวิธีการแผ่รังสี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่ได้รับความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดระหว่างการผลิตเดกซ์ทรีน โดยสมบัติที่มุ่งเน้นการศึกษาได้แก่ โครงสร้างทางกายภาพของเม็ดแป้ง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ความหนืด ค่าการละลาย และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรด รวมถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ระดับอุณหภูมิ 170, 190 และ 210 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมงเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเดกซ์ทรีน โดยแป้งมันสำปะหลังมีความชื้นเริ่มต้น 12.17 %db จากการศึกษาการลักษณะทางกายภาพของเม็ดแป้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแป้งเล็กลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ความหนืดของแป้งลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ในขณะที่ค่าการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแป้ง จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนต่างกันที่เวลาเดียวกันความหนืดและค่าการละลายมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแป้งที่ผ่านการให้ความที่อุณหภูมิ 210 °C มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดและค่าการละลายมากที่สุด ผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในสารละลายแป้งพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะสามารถวัดค่าได้เมื่อทำการให้ความร้อนแป้งด้วยอุณหภูมิ 210 °C เป็นเวลานานกว่า 10 ชั่วโมง

Thesis	Effect of Infrared Heat Treatment on Properties of Tapioca Flour during Dextrin Production
Student	Mr.Peerapat Uraives
Student ID.	58601294
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Prasan Choomjaihan

ABSTRACT

Dextrin is one type of modified starch. Dextrin has been widely used in various processes such as food, textile, paper, glue and etc. Dextrin was produced from hydrolyzed starch by enzymes, acid or heating at high temperature. To date, a few researchers related on the heating by radiation heat transfer. Therefore, the aim of this research was to determine the properties of Tapioca flour including structure of starch granules, total color difference, viscosity, solubility and total soluble solid during Dextrin production infrared radiation. Tapioca flour samples were heated by an infrared heater at 170, 190 and 210 °C and monitored the change in their properties every 2 h until 20 h of heating. The initial moisture of Tapioca flour was 12.17 %db. The results showed that increasing of the heating temperature and time decreased the viscosity and average diameter of starch granules while increased the total color different and solubility of flour. The viscosity, solubility and average diameter of starch granules of different heating temperatures were significantly different ($p < 0.05$). Total soluble solid was detected when the heating time was longer than 10 h with the heating temperature of 210 °C.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประสันท์ ชุ่มใจหาญ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการทดลอง

ขอบพระคุณสำหรับทุนทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2558 ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พีรภัทร อุไรเวช



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของการทำวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้ทั่วไปของน้ำมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลัง.....	3
2.2 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง.....	6
2.3 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง.....	9
2.4 การดัดแปรแป้ง.....	15
2.5 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเดกซ์ทริน.....	18
2.6 การวัดค่าความหนืดของแป้ง.....	23
2.7 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้.....	26
2.8 การวิเคราะห์สี.....	28
2.9 การวิเคราะห์ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์.....	30
2.10 การให้ความร้อนวัสดุโดยใช้รังสีอินฟราเรด.....	31
2.11 ผลของการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้ง.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ.....	36
3.1 วิธีการดำเนินงาน.....	36
3.2 การตรวจสอบโครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้ง.....	39
3.3 การวัดค่าสีของแป้งมันสำปะหลัง.....	40
3.4 การศึกษาความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง.....	41
3.5 การศึกษาค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลัง.....	43
3.6 การศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของแป้งมันสำปะหลัง.....	45
3.7 การศึกษาหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้หลอดรังสีอินฟราเรด.....	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	47
4.1 โครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้ง.....	47
4.2 ค่าสีของแป้งมันสำปะหลัง.....	49
4.3 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง.....	52
4.4 ค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลัง.....	54
4.5 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งมันสำปะหลัง.....	57
4.6 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังโดยใช้หลอด รังสีอินฟราเรด.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	71
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค งานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	100



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง.....	49
4.2 ความแตกต่างของค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของแป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	51
4.3 ความแตกต่างของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	54
4.4 ความแตกต่างของค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	56
4.5 ความแตกต่างของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	59
4.6 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการให้ความร้อนแป้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หัวมันสำปะหลัง.....	4
2.2 แป้งมันสำปะหลัง.....	4
2.3 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส.....	7
2.4 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพคติน.....	8
2.5 ลักษณะของเม็ดแป้งบางชนิดที่ส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์.....	11
2.6 ลักษณะของเม็ดแป้งบางชนิดที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน.....	11
2.7 ลักษณะโครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง.....	12
2.8 การเกิดเจลาตินไนเซชัน.....	14
2.9 โครงสร้างทางเคมีของเด็กซ์ทรีน.....	18
2.10 เด็กซ์ทรีนขาว เด็กซ์ทรีนเหลือง และบริทิชกัม.....	19
2.11 กาวเด็กซ์ทรีน.....	20
2.12 หม้อแลกเปลี่ยนความร้อน.....	21
2.13 เอ็กซ์ทูเดอร์.....	22
2.14 เครื่องอบแห้งแบบท่อหมุน.....	23
2.15 เครื่องมือวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์.....	24
2.16 เครื่องวัดความหนืดแบบหลอด.....	25
2.17 เครื่องบราเบนเดอร์อะไมโลกราฟ.....	25
2.18 Rapid Visco Analyzer.....	26
2.19 Hand-Held Refractometer.....	27
2.20 Digital Refractometer.....	27
2.21 Spectrophotometer (Hunter Lab, MiniScan XE PLUS).....	29
2.22 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ.....	29
2.23 ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	30
2.24 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	32
3.1 แผนภูมิขั้นตอนการทดลองทั้งหมด.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 อุปกรณ์ในการให้ความร้อนแก่ไขมันสำหรับละลาย.....	38
3.3 ไขมันสำหรับละลายที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.4 การสูบลมตัวอย่างแข็งเพื่อนำไปฉายเคลือบทอง.....	39
3.5 Polaron Emitech (Quorum Technologies Ltd., SC7640).....	40
3.6 Scanning Electron Microscopy (Carl Zeiss Co., EVO MA10).....	40
3.7 ค่า L^* , a^* และ b^*	41
3.8 Rotational Viscometer (Brookfield, DV-E).....	42
3.9 อ่างน้ำร้อน (Memmert, W600).....	42
3.10 ขั้นตอนการหาความหนืดของไขมันสำหรับละลาย.....	43
3.11 Microcentrifuge (Labnet, Spectrafuge 7M).....	44
3.12 ขั้นตอนการหาค่าการละลายของไขมันสำหรับละลาย.....	44
3.13 Pocket Refractometer (Atago, Model PAL-1).....	45
3.14 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Fluke, Clamp Meter 322).....	46
4.1 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของไขมันสำหรับละลายแบบต่างๆ	48
4.2 ไขมันที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง.....	50
4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ของไขมันสำหรับละลายที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาต่างๆ.....	51
4.4 การให้ความร้อนสารละลายไขมันในอ่างน้ำร้อน.....	53
4.5 ความหนืดของไขมันสำหรับละลายที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาต่างๆ.....	53
4.6 ของเหลวที่แยกชั้นออกจากตะกอนหลังจากการเหวี่ยง.....	55
4.7 ค่าการละลายของไขมันสำหรับละลายที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาต่างๆ.....	56
4.8 สารละลายไขมันสำหรับการทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้.....	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาต่างๆ.....	58
4.10 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของการให้ความร้อนแป้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

มันสำปะหลัง (Tapioca) จัดเป็นพืชอยู่ในตระกูล Euphobiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Manihotesculenta Crantz. [1] มันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างหลากหลาย มันสำปะหลังถูกนำไปผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้ในการอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อาหาร สิ่งทอ กระดาษ และกาว เป็นต้น [1] ประเทศไทยถูกจัดอันดับให้เป็นประเทศส่งออกแป้งมันสำปะหลังสูงเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยมีมูลค่าการส่งออกประมาณ 63,000 ล้านบาท ซึ่งในส่วนนี้เป็นการส่งออกแป้งตัดแปรรูป 21,000 ล้านบาท [2]

เดกซ์ทริน (dextrin) เป็นแป้งตัดแปรรูปชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 30 μm ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ กรด ความร้อน หรือ ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดรวมกับการให้ความร้อน [3] โดยทั่วไปเดกซ์ทรินสามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ เดกซ์ทรินขาว (white dextrin), เดกซ์ทรินเหลือง (yellow dextrin) และบริติชกัม (British gums) การได้มาซึ่งเดกซ์ทรินแต่ละประเภทนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยพื้นฐานแล้วการผลิตเดกซ์ทรินทำได้โดยการให้แป้งได้รับความร้อน (heat treatment) เป็นเวลา 10 ถึง 20 ชั่วโมงโดยวิธีการคั่วหรือผ่านตัวกลางนำความร้อนเช่น เกลียว (extrusion) และถึงแก่เปลี่ยนแปลงความร้อนในลักษณะการกวน (vat dryer) ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200 $^{\circ}\text{C}$ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เช่น กรดเกลือและบอแรกซ์ (borax) การผลิตเดกซ์ทรินขาวใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา การผลิตเดกซ์ทรินเหลืองใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าเดกซ์ทรินขาว สำหรับการผลิตบริติชกัมใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการ สีของเดกซ์ทรินหลังการให้ความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน โดยเมื่อเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับแป้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้สีของเดกซ์ทรินมีความเป็นสีเหลืองจนถึงน้ำตาลเข้มมากขึ้น [4]

สมบัติทั่วไปของเดกซ์ทรินคือ เมื่อละลายน้ำมีความหนืดน้อยกว่าแป้ง มีความสามารถในการจับตัวเป็นก้อน ละลายน้ำได้ดี โดยเฉพาะในน้ำเย็น และสามารถกำหนดความข้นหนืดได้ตามความต้องการ [4] ทำให้เดกซ์ทรินถูกนำไปใช้ในการผลิตเป็นส่วนผสมของอาหารและผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เช่น การผลิตยาเม็ดเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันดีขึ้นของส่วนผสมต่างๆ การผลิตบรรจุภัณฑ์จากกระดาษ ผลิตกาวติดแสตมป์ สิ่งทอ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ สีน้ำ และดอกไม้ไฟ เป็นต้น [4]

การใช้รังสีอินฟราเรดในการให้ความร้อนเป็นวิธีการหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร [5] ที่มีการให้ความร้อน เช่นวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของวัสดุทางการเกษตรและอาหาร การฆ่าเชื้อและการอบแห้ง เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดกับการให้ความร้อนโดยการนำความร้อนและการพาความร้อน พบว่าการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่า [6] นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนสั้นกว่า การให้ความร้อนมีความสม่ำเสมอกว่า ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนสูง อุปกรณ์ที่ใช้งานมีความเรียบง่ายและประหยัดพลังงานมากกว่า [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันการผลิตเดกซ์ทรินโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดยังไม่เป็นที่แพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อที่จะทำการทดสอบสมบัติของเดกซ์ทรินที่ผ่านการให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรดกับแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วย โครงสร้างของเม็ดแป้ง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ความหนืด ค่าการละลาย และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ รวมถึงศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังโดยใช้รังสีอินฟราเรด การศึกษาดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตเดกซ์ทรินและออกแบบการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ และสมบัติของเดกซ์ทริน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อค่าพลังงานที่ใช้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ภายหลังจากการทำการทดลองผู้ทำงานวิจัยคาดว่าผู้ประกอบการรวมถึงผู้ที่สนใจสามารถนำสถานะที่เหมาะสมในการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังโดยใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแนวทางในการผลิตเดกซ์ทรินจากแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ ได้หลายประเภท และเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าและใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด

1.4 ขอบเขตของการทำวิจัย

1.4.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตในจังหวัดชลบุรี ประเทศไทย ขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 30 ไมโครเมตร

1.4.2 ทดลองให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังโดยใช้รังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

1.4.3 ศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ โครงสร้างและความเสียหายของเม็ด ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมแป้ง ความหนืด ค่าการละลาย และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก่อนทำการศึกษาการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพื่อการผลิตเดกซ์ทริน มีความจำเป็นอย่างมากในการทำความเข้าใจในเนื้อหาเรื่องความรู้ทั่วไปของมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลัง เนื้อหาและงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ได้ถูกแบ่งออกเป็นหัวข้อ ได้แก่ ความรู้ทั่วไปของมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลัง องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง การตัดแป้ง ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเดกซ์ทริน การวัดค่าความหนืดของแป้ง การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ การวิเคราะห์สี การวิเคราะห์ภาพถ่ายอิเล็กตรอนไมโครสโคป การให้ความร้อนวัสดุด้วยรังสีอินฟราเรด และผลของการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้ง ซึ่งได้มีการบรรยายและมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปของมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลัง

2.1.1 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังจัดเป็นพืชอยู่ในตระกูล Euphobiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz. จัดเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ เจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนปนทรายที่มีสภาพเป็นกรด (pH น้อยกว่า 4.4) แต่ไม่สามารถเติบโตในดินที่มีสภาพเป็นด่าง (pH มากกว่า 8.0) มันสำปะหลังเป็นพืชที่สามารถปลูกในที่แล้งที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่า 1000 มิลลิเมตรต่อปี การปลูกจะเริ่มในฤดูฝน การขยายพันธุ์จะทำเมื่อต้นกล้ามีความสูงประมาณ 20 เซนติเมตรหรือมีตาบริเวณลำต้นอย่างน้อย 4 ตา วิธีการปลูกทำโดยการปักลงในดินเป็นแนวตั้งหรือเอียง การปักลงในแนวตั้งจะช่วยให้มีอัตราการเติบโตที่สูงและเก็บเกี่ยวได้ง่าย โดยระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวจะใช้เวลาประมาณ 10 ถึง 12 เดือน หลังจากการปลูก เมื่อโตเต็มที่ลำต้นจะสูงประมาณ 1 ถึง 5 เมตร รากจะมีความยาวลึกลงไปใต้ดินประมาณ 1 เมตร การเก็บเกี่ยวเร็วหรือช้าเกินไปจะส่งผลให้ปริมาณแป้งในมันสำปะหลังที่ได้น้อยลง ปริมาณของมันสำปะหลังที่ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการเพาะปลูก สภาพอากาศ การใส่ปุ๋ย การกำจัดวัชพืช อัตราการให้น้ำ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของมันสำปะหลังอีกด้วย ส่วนของมันสำปะหลังที่นำมาใช้ในการบริโภคเป็นส่วนของรากใต้ดิน ซึ่งเรียกว่าหัว (รูปที่ 2.1) ประกอบไปด้วยส่วนหลักคือแป้งคิดเป็น 20 ถึง 32 เปอร์เซ็นต์ของหัวมันสำปะหลัง [1]



รูปที่ 2.1 หัวมันสำปะหลัง [8]



รูปที่ 2.2 แป้งมันสำปะหลัง [9]

แป้งมันสำปะหลัง (รูปที่ 2.2) ได้มาจากรากของต้นมันสำปะหลัง การทำไร่มันสำปะหลังมีการเพาะปลูกในพื้นที่บริเวณเส้นศูนย์สูตร มันสำปะหลังในแต่ละพื้นที่มีชื่อเรียกแตกต่างกันเช่น yucca (อเมริกากลาง), mandioca หรือ manioca (บราซิล), tapioca (อินเดียและมาเลเซีย), cassada หรือ cassava (แอฟริกาและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้) ส่วนในแถบอเมริกาเหนือและยุโรปใช้คำว่า cassava ในการเรียกรากของมันสำปะหลังและใช้คำว่า tapioca ในการเรียกแป้งและผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากมันสำปะหลัง

2.1.2 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง [10]

การผลิตแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยขั้นตอนหลัก คือ การนำส่วนหัวมาทำความสะอาด จากนั้นบด เพิ่มความเข้มข้นของน้ำแป้ง และการทำแห้ง

1. การเตรียมหัวมันสำปะหลังและทำความสะอาด (washing) หัวมันสำปะหลังที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพเช่น ปริมาณแป้งในหัวมันแล้ว จะถูกส่งเข้าสู่เตาแรงร้อนดินและทรายเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกเอาดินออก จากนั้นสำลียงเข้าสู่เครื่องล้างเพื่อทำความสะอาดหัวมันอีกครั้งแล้ว นำเข้าสู่เครื่องสับและขูดเปลือก จากนั้นแยกเอาเปลือกออกก่อนเข้าสู่เครื่องบด

2. การบดหัวมันสำปะหลัง (rasping) หัวมันสำปะหลังที่สะอาดจะถูกส่งไปยังเครื่องสับ เพื่อลดขนาดหัวมันสำปะหลังให้เล็กลงประมาณ 1 ถึง 2 นิ้ว เข้าสู่เครื่องขูดหรือบด ซึ่งอยู่ด้านล่าง ทำให้ได้มันสำปะหลังมีชิ้นละเอียดยิ่งขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดแป้ง หลังจากนั้นเติมน้ำและนำเข้าสู่เครื่องสกัด (extractor) เพื่อสกัดแยกแป้งออกจากเซลลูโลส โดยทั่วไปจะเป็นการสกัดแบบหลายครั้ง โรงงานส่วนใหญ่ใช้ชุดสกัด 3 ชุด แต่โรงงานขนาดใหญ่ อาจมีถึง 4 ชุดต่อเนื่องกัน โดยชุดแรกเป็นการสกัดหยาบใช้ตะแกรงขนาด 60 ถึง 80 mesh และชุดสุดท้ายเป็นการสกัดละเอียดโดยใช้ผ้ากรองขนาด 90 mesh ในขั้นตอนนี้ โรงงานมีการเติมน้ำกำมะถัน เพื่อยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งจะเปลี่ยนโมเลกุลของแป้งเป็นกรดแลคติก กากมันสำปะหลังที่เหลือจากขั้นตอนการสกัดแป้งจะมีน้ำอยู่ในปริมาณมาก และปริมาณแป้งเหลือน้อยจะถูกแยกออกจากน้ำแป้งเพื่อนำเข้าสู่เครื่องอัดกากและนำไปตากแดดเพื่อนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์หรือนำไปผสมกับมันเส้นเพื่อทำมันอัดเม็ดต่อไป

3. การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแป้ง (separation) เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและชีวเคมีจากจุลินทรีย์ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของแป้งลดลง การผลิตแป้งมันสำปะหลังจึงต้องกระทำภายในเวลาสั้นที่สุด ดังนั้นในกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของแป้ง จึงเป็นกระบวนการต่อเนื่องที่ไม่มีถังพักเช่นเดียวกับกระบวนการอื่นๆ น้ำแป้งที่ถูกแยกออกจากกากมันสำปะหลังจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องแยก (separators) ซึ่งอาจเป็นเครื่องแยกชนิดหมุนเหวี่ยง (centrifugal separators) หรือ ไฮโดรไซโคลน (hydrocyclone) โดยโรงงานส่วนใหญ่ใช้เครื่องแยกชนิดหมุนเหวี่ยง และเพื่อให้ได้แป้งมันสำปะหลังที่มีคุณภาพดีจึงมักใช้เครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงจำนวน 2 ชุดเพื่อแยกกากมันสำปะหลังออกให้หมดและทำให้น้ำแป้งเข้มข้น

4. การทำให้แห้งและการบรรจุผลิตภัณฑ์ (drying and packing) น้ำแป้งจะถูกแยกน้ำออกจากแป้งโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) แป้งที่ถูกแยกเอาน้ำออกแล้วจะถูกพ่นเข้าสู่ท่อไอร้อนซึ่งมีลมร้อนประมาณ 200°C จากเตาเผา เป่าเข้ามาด้วยความดันสูง ความแรงของลมจะพัดเอาแป้งขึ้นไปตามปล่องสูง แล้วตกมาสู่ไซโคลน (cyclone) ระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งเป็นช่วงเวลาดังกล่าว เพื่อป้องกันการรวมตัวของแป้งเป็นเม็ดและเพื่อป้องกันการสลายตัวของแป้งอีกทางหนึ่งด้วย ลมร้อนที่ใช้ในการทำแห้งเกิดจากการเผาน้ำมันเตา และผ่านการกรองก่อนจะถูกเป่าเข้าสู่เครื่องอบแห้งเพื่อป้องกันแป้งถูกปนเปื้อนด้วยสิ่งสกปรก แป้งมันสำปะหลังที่ได้จากไซโคลนจะเป็นแป้งที่แห้งและละเอียด แต่ยังมีร้อนอยู่ ซึ่งจะต้องทำให้เย็นโดยทันที ด้วยการใส่ไซโคลนเย็น ก่อนจะถูกปล่อยลงสู่เครื่องร่อนแป้ง เพื่อให้อนุภาคของแป้งมีความสม่ำเสมอ แป้งที่แห้งแล้วจะถูกร่อนผ่านตะแกรงก่อนที่จะบรรจุลงสู่ไซโล โดยส่วนใหญ่ไซโลจะมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะบรรจุแป้งที่เกิดจากการผลิตใน 24 ชั่วโมงได้ การบรรจุแป้งลงถุงของโรงงานที่มีขนาดเล็กจะใช้ระบบกึ่งอัตโนมัติ ส่วนโรงงานที่มีขนาดใหญ่จะใช้ระบบอัตโนมัติในการเปิดถุงและบรรจุลงถุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การส่งออกแป้งมันสำปะหลังของไทย

อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยประเทศไทยนั้นเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังสูงเป็นอันดับ 3 ของโลก [9] ซึ่งมีผลผลิตประมาณ 22.2 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการส่งออกสูงเป็นอันดับ 1 ของโลก โดยในปี 2557 ประเทศไทยส่งออกแป้งมันสำปะหลัง 3,900,000 ตัน มูลค่าส่งออก 63,000 ล้านบาท โดยแป้งดัดแปร (Modified starch) มีการส่งออกอยู่ที่ 940,000 ตัน มูลค่าการส่งออก 21,000 ล้านบาท เมื่อเทียบสัดส่วนการผลิตและส่งออกแล้วถือว่ามียุทธศาสตร์ที่ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังดิบ (Native Starch) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified Starch) ในปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังทั้งหมด 69 โรงงาน แบ่งเป็นโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ 47 โรงงาน โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 13 โรงงาน และโรงงานที่ผลิตทั้ง 2 ประเภท 9 โรงงาน [2]

2.2 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีสูตรเคมีทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ของน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ภายในแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลสและอะไมโลเพกทิน ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้แป้งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันด้วย [12] แป้งเป็นโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช ซึ่งได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช พืชเก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนต่างๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้น และผล โดยรวมตัวกันอยู่เป็นเม็ดแป้ง (starch granule) แป้งเป็นสารอาหารที่ให้พลังงานสำคัญที่สุดแก่มนุษย์ แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะตัวกล่าวคือ มีโครงสร้างทางเคมีโมเลกุลแตกต่างกัน และเม็ดแป้งจะมีรูปร่าง และสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันด้วย [3]

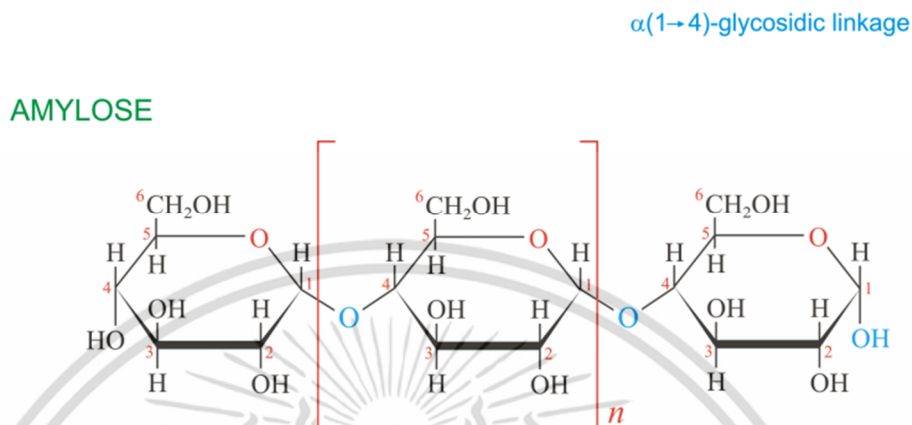
2.2.1 องค์ประกอบหลักของแป้ง

1. อะไมโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกลูโคส ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสประมาณ 250 ถึง 2000 หน่วย เรียงต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-Glycosidic linkage ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 โมเลกุลของอะไมโลสมีน้ำหนักประมาณ 10^6 ดาลตัน ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะมีขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization, DP) ของอะไมโลสต่างกัน แป้งที่มีอะไมโลสสายยาวจะมีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรดชันลดลง อะไมโลสสามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ดีเมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ โมเลกุลของอะไมโลสจะกระจายตัวออกมาจากเม็ดแป้ง ทำให้มีความหนืดลดลงและเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการคืนตัวมากทำให้โมเลกุลมารวมตัวกัน ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นต่ำ การรวมตัวกันของอะไมโลสจะทำให้เกิดตะกอน

แต่ถ้าหากสารละลายมีความเข้มข้นสูง การรวมตัวกันของอะไมโลสจะทำให้เกิดเจล อะไมโลสสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

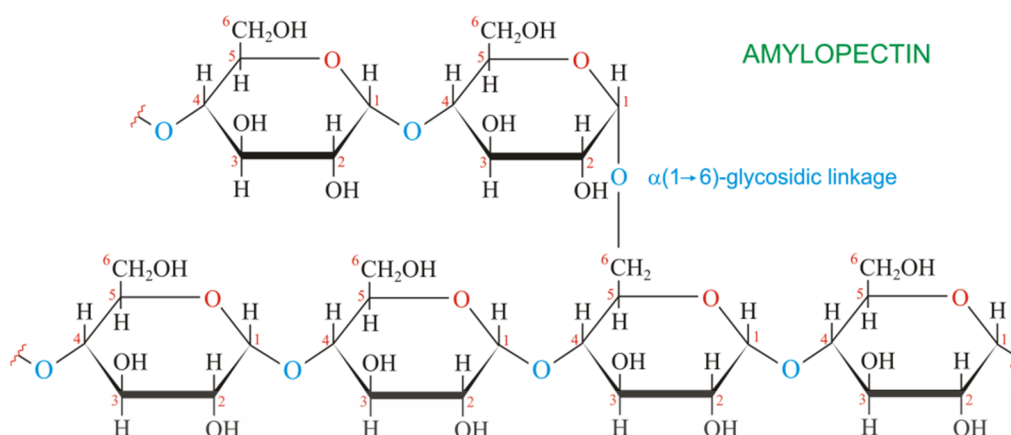
รวมตัวกับไอโอดีนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน ใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกว่าแป้งมีองค์ประกอบของอะไมโลส [12]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส [13]

2. อะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส สายพอลิเมอร์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของหน่วยกลูโคส โดยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-Glycosidic linkage ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาสายสั้นประกอบด้วยหน่วยกลูโคสจำนวน 10 ถึง 60 หน่วย โดยเชื่อมต่อกับส่วนที่เป็นสายตรงด้วยพันธะ α -1,6-Glycosidic linkage อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตันและมีอัตราการคินตัวต่ำ เนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา ดังนั้นโอกาสที่โมเลกุลของอะไมโลเพคตินจะรวมตัวกันเองจึงเกิดขึ้นได้น้อย เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งที่มีอะไมโลเพคตินสูง แป้งเปียกที่ได้จะใสและมีความหนืดสูง อะไมโลเพคตินเมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะเกิดเป็นสารประกอบสีแดง [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพคติน [14]

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีอะไมโลสค่อนข้างต่ำ Defloor [15] รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังมีอะไมโลสอยู่ระหว่างร้อยละ 17.9 ถึง 23.6 เช่นเดียวกับรายงานของ Li and Yeh [16] ที่รายงานว่แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 19.9 โดยแป้งทั่วไปมีปริมาณอะไมโลสอยู่ร้อยละ 20 และเป็นโมเลกุลของอะไมโลเพคตินร้อยละ 80 [17] โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลแต่ละสาย ตำแหน่งที่อยู่ในเม็ดแป้งและสัดส่วนของโมเลกุลต่ออะไมโลเพคตินที่แตกต่างกัน

3. โปรตีน (Protein) ภายในแป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยพบบริเวณขอบหรือฝักอยู่ภายในเม็ดแป้ง โปรตีนมีผลทำให้เกิดประจุบนผิวของเม็ดแป้งโดยพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนที่เกาะอยู่ที่เม็ดแป้งจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในเม็ดแป้งสูงขึ้น [14] ซึ่งมีผลต่อการกระจายตัว ความหนืด อัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และลดอัตราการเกิดเจลลาคีโนเซชันของแป้ง [19]

4. ไขมัน (Lipid) แป้งมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยไขมันที่พบอยู่บริเวณขอบหรือฝักของเม็ดแป้ง ได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ และฟอสโฟไลพิด นอกจากนี้ยังมีไขมันที่กระจายตัวอยู่ภายในเม็ดแป้ง โดยไขมันจะรวมตัวกับโมเลกุลของอะไมโลสเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลส เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนไปเสริมความแข็งแรงแก่เม็ดแป้ง [20] ทำให้ความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวของน้ำกับแป้งลดลง โดยที่สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นทำให้เกิดฟิล์มและแป้งเปียกที่มีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น [21]

5. เถ้า (Ash) ปริมาณเถ้าเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณสารอนินทรีย์ โดยทั่วไปแป้งมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น [19]

2.3 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง

เมื่อพืชสังเคราะห์แสงได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวแล้ว จะมีกระบวนการลำเลียงน้ำตาลเหล่านั้นมาสู่ส่วนที่จะเก็บไว้เป็นพลังงานโดยจะรวมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านั้น เป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่ และก่อตัวเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า เม็ดแป้ง ดังนั้นแป้งจึงเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืช พบทั้งในเมล็ด ผล ราก ลำต้น และใบของพืช แป้งจากพืชแหล่งต่างๆ นั้นจะมีสมบัติโดยรวมๆ ใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างกันในสมบัติเฉพาะตัวบางอย่าง ซึ่งทำให้แป้งแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนประเภทเดียวกับ เซลลูโลส ไกลโคเจน และเดกซ์ทริน เกิดจากน้ำตาลเฮกโซส (hexose) เรียกว่า เฮกโซซาน (hexosan) โดยเป็นพอลิเมอร์ (polymer) ของ α -D-glucose แป้งประกอบด้วยอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์แบบสายตรงที่หน่วยกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1,4) glucosidic มี anhydroglucose unit (AGU) ประมาณ 200 ถึง 2,000 หน่วย ส่วนอะไมโลเพกติน เป็นพอลิเมอร์ที่แตกเป็นสาขามากมาย ซึ่งหน่วยกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1,4) glucosidic เป็นส่วนใหญ่ และส่วนที่แตกสาขาเชื่อมกันด้วยพันธะ α -D-(1,6) glucosidic แต่ละสาขาประกอบด้วยหน่วยกลูโคส (AGU) ประมาณ 15 ถึง 25 หน่วย แป้งต่างชนิดกันจะมีสัดส่วนของ อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน ต่างกัน [22]

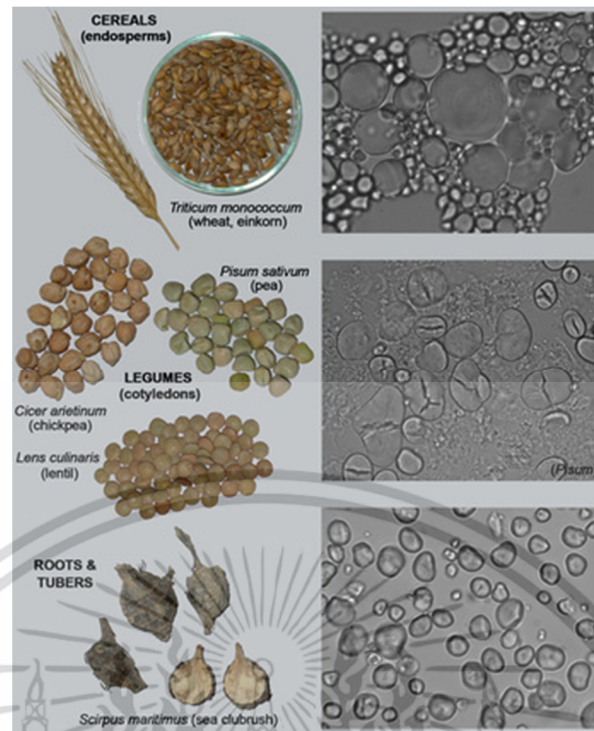
อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกตินมีผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของแป้ง โดยมีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง ความใสและความหนืดของน้ำแป้ง แป้งที่มีอะไมโลสสูงจะดูดน้ำและมีการพองตัวของเม็ดแป้งช้าลง จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าปกติเพื่อให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้งอย่างสมบูรณ์ แต่ถ้ามีอะไมโลสในปริมาณที่สูงมาก เมื่อต้มในน้ำเดือดเม็ดแป้งดูดน้ำได้น้อยเกินไปจนไม่สามารถพองตัวจนแตกออก ทำให้อะไมโลสไม่สามารถหลุดออกจากเม็ดแป้งได้ ดังนั้นเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นจะไม่เกิดเป็นเจล เช่น แป้งข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสสูงมากกว่าร้อยละ 33 แต่แป้งข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสประมาณร้อยละ 27-33 จะให้เจลที่มีลักษณะเหนียวหนืดดี เหมาะสำหรับทำเส้นก๋วยเตี๋ยวหรือเส้นหมี่ และถ้าอะไมโลสต่ำเกินไปแต่มีอะไมโลเพกตินสูง เช่น แป้งข้าวเหนียว เมื่อ paste เย็นตัวลงจะไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้เช่นกัน

โดยทั่วไปในเม็ดแป้ง อะไมโลส และอะไมโลเพกตินจะวางตัวในแนวรัศมี สายของอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ในแนวที่ขนานกันจะสร้างพันธะไฮโดรเจนทั้งทางตรง หรือเกิดการเกาะตัวกับน้ำ (Hydrate bridge) เกิดพื้นที่ส่วนที่เรียกว่า micelles หรือ crystallites ขึ้น ทำให้สามารถแบ่งเม็ดแป้งได้เป็น 2 ส่วน คือ micelles หรือ crystallites กับ gel phase แต่ละโมเลกุลในหลาย ๆ micelles จะเชื่อมกันเป็นร่างแห 3 มิติด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งความแข็งแรงของร่างแหขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุล ที่มาเชื่อมต่อกัน และการจัดเรียงโมเลกุลของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งจึงมีคุณสมบัติในการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโครงสร้างแบบไบร์ฟรินเจนซ์ (birefringence) [19]

ในรูปแป้งแห้งจะไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างแป้งชนิดต่างๆ ได้ แต่ถ้าใช้กล้องจุลทรรศน์ จะเห็นได้ว่าแป้งประกอบด้วยเซลล์เล็กๆ หรือเม็ดแป้งเล็กๆ ซึ่งขนาดและรูปร่างจะต่างกัน ไม่เท่ากันทีเดียว ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปตามพันธุ์พืช เม็ดแป้งทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 10 ไมครอน มีรูปร่างต่างกันเช่น กลม รูปไข่ และอื่นๆ

เม็ดแป้งข้าวเจ้ามีขนาดเล็กที่สุดคือขนาด 3 ถึง 8 ไมครอน มีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมมักพบอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงเห็นไฮลัม (ศูนย์กลางของเม็ดแป้ง) วงแหวน (เนื้อเยื่อที่เจริญเติบโตมาจากไฮลัม) และเครื่องหมายกากบาท หรือ ไบรฟ์พรินเจนซ์ (วงแหวนไฮลัมเมื่อส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์) ไม่ชัดเจน เม็ดแป้งมันฝรั่งมีขนาดใหญ่และเล็กคละกันมีขนาด 15 ถึง 100 ไมครอน ขนาดใหญ่จะมีลักษณะรูปไข่ขนาดเล็กจะมีลักษณะเหมือนหอยนางรม (oyster) เห็นไฮลัมได้ชัดเจน โดยอยู่ทางปลายด้านที่เล็กกว่าของเม็ดแป้งและเห็นเครื่องหมายกากบาทได้ชัดเจน เม็ดแป้งข้าวโพดมีขนาด 10 ถึง 25 ไมครอน มีทั้งลักษณะกลมและหลายเหลี่ยมและคล้ายคลึงกันทั้งแบบธรรมดาและแบบข้าวเหนียว (waxy maize) แต่รูปร่างเม็ดแป้งข้าวโพด ข้าวเหนียวจะมีเหลี่ยมมากกว่า มีไฮลัมและเครื่องหมายกากบาทที่เห็นได้ชัดเจนพอควร เม็ดแป้งมันสำปะหลังขนาด เฉลี่ยเท่าๆ กับเม็ดแป้งข้าวโพด โดยอยู่ในช่วง 5 ถึง 35 ไมครอน แต่จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมหรือรูปไข่ที่มีด้านหนึ่งตัดตรง ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของแป้งนี้ ไฮลัมจะอยู่ตรงศูนย์กลางเห็นเครื่องหมายกากบาทได้ชัดเจน เม็ดแป้งมันเทศ (sweet potato starch granule) มีลักษณะคล้ายเม็ดแป้งข้าวโพด แต่มีขนาดใหญ่กว่าโดยเฉลี่ยประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่า เห็นไฮลัมและเครื่องหมายกากบาทไม่ชัดเจน เม็ดแป้งสาลิ แป้งไรน์ และแป้งบาร์เลย์ มีลักษณะกลมที่คล้ายกัน โดยมีทั้งขนาดใหญ่และเล็กคละกัน ขนาดเล็ก 2 ถึง 6 ไมครอน และขนาดใหญ่ 20 ถึง 35 ไมครอน ไฮลัมและเครื่องหมายกากบาทเห็นไม่ชัดเจนมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กัน โดยรูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของเม็ดแป้งบางชนิดที่ส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์ และรูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของเม็ดแป้งบางชนิดเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเม็ดแป้งบางชนิดที่ส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์ [23]



รูปที่ 2.6 ลักษณะของเม็ดแป้งบางชนิดที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

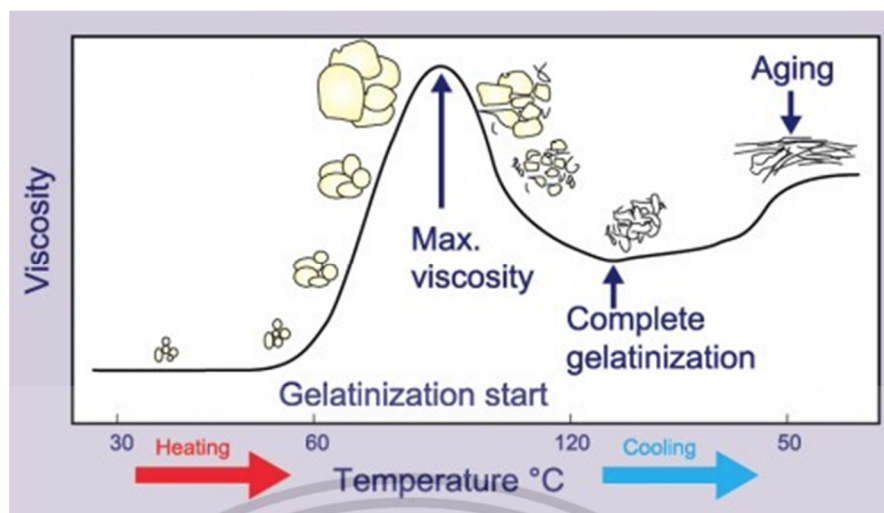
ขนาดเม็ดแป้ง การทำให้เกิดเจลลาตินในเซชัน เป็นต้น จะส่งผลให้แป้งสามารถดูดซับน้ำและพองตัวได้ดีกว่าแป้งธรรมชาติ [28]

แป้งธรรมชาติจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชัน เนื่องจากโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) จำนวนมากและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างแน่นหนา ซึ่งพันธะไฮโดรเจนเกิดจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้กันเกิดการเชื่อมกัน [29] แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายแป้งให้สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชัน พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวขึ้นและบางส่วนของแป้งจะละลาย ทำให้ความหนืด ความใส และค่าการละลายเพิ่มขึ้น โดยกำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรและน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ [30]

Tester and Morrison [31] รายงานว่า การพองตัวของแป้งเกิดจากการสูญเสียการจัดระเบียบในโครงสร้างผลึกของโมเลกุลอะไมโลเพคติน เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเกลียวคู่ของอะไมโลเพคตินจะแยกออกจากกันและโมเลกุลบางส่วนละลายออกมาเมื่อเม็ดแป้งเกิดเจลลาตินในเซชัน ทำให้ลักษณะโครงสร้างไบร์พรีนเจนซ์ของแป้งหายไปหมด โดยที่ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งมีหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของรูปร่างภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว และคุณสมบัติหลังการตัดแปรแป้งทางเคมี [26]

2.3.4 การเกิดเจลลาตินในเซชัน [3]

เจลลาตินในเซชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งโดยการให้ความร้อนกับสารละลายแป้งที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลลาตินในเซชัน การเกิดเจลลาตินในเซชันทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นและใสขึ้น ความร้อนจะทำให้โครงสร้างผลึกถูกละลาย เม็ดแป้งจึงสูญเสียลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกไปเป็นส่วนที่ไม่เป็นผลึก ทำให้เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างแบบไบร์พรีนเจนซ์หายไป อุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกันเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ เช่น สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ปริมาณไขมัน การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในเม็ดแป้ง เป็นต้น โดยรูปที่ 2.8 แสดงการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อน



รูปที่ 2.8 การเกิดเจลาตินในเซชัน [32]

Kasemsuwan [20] ได้ทำการตรวจวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่อง DSC พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 63°C ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 61.5 ถึง 82.2°C สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gunarate and Hoover [33] ที่รายงานว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ในช่วง 63 ถึง 81.5°C นอกจากนี้ Li and Yeh [16] ได้ศึกษาอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่อง DSC พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันสำปะหลังมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 64.5°C อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาตินในเซชันเท่ากับ 71.0°C

2.3.5 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชันแล้วและมีการให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก เม็ดแป้งนี้มีความหนืดลดลง โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะกระจายออกมา และเมื่อมีการปล่อยสารละลายแป้งให้เย็นตัวลง โมเลกุลที่อยู่ใกล้กันโดยเฉพาะอะไมโลสจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ (Recrystallization) ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดซับน้ำเข้ามาอีก [34] ทำให้แป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้นและคงตัวมากขึ้นเป็นเจลที่มีลักษณะเหนียว ชุ่มและทึบแสง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า รีโทรเกรเดชัน หรือการคืนตัว (Setback) และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงอีก การจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในเม็ดแป้งจะถูกบีบออกนอกเจล โดยปรากฏการณ์ลักษณะนี้เรียกว่า การแยกตัวของน้ำ (Syneresis) และหากการคืนตัวของแป้งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน แต่ถ้าการคืนตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลชุ่มและมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น [35] น้ำหนักโมเลกุลและลักษณะ

โครงสร้างของอะไมโลสมีผลต่อการคืนตัวของแป้ง โดยแป้งที่มีโมเลกุลอะไมโลสเป็นองค์ประกอบสูงจะสามารถคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีอะไมโลเพคตินเป็นองค์ประกอบสูง

การทดสอบการคืนตัวของแป้งอาจจะประมาณได้จากค่าการคืนตัว ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด หรือความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด โดยใช้เครื่อง Brabender หรือ Rapid visco analyzer (RVA) ในการวิเคราะห์ [19]

2.3.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง

ความหนืดเป็นสมบัติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้งเมื่อแป้งได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลถูกทำลาย โดยที่การพองตัวนั้นจะทำให้ น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งจึงเคลื่อนที่ได้ยากทำให้เกิดความหนืดขึ้น [36] อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (Pasting Temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เม็ดแป้งจะพองตัวมากขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ซึ่งเป็นจุดที่ใช้บ่งบอกว่าเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และถ้าหากให้ความร้อนต่อไปเม็ดแป้งจะแตกตัว โมเลกุลอะไมโลสจะ กระจายออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อมีการลดอุณหภูมิลงจะทำให้เกิดการจับเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสหรือการเกิดรีโทรเกรดชัน [37] ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เรียกว่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) Srichuwong [38] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดอยู่ที่ 67.4 °C โดยค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ 47.0 RVU

2.4 การดัดแปรแป้ง

เนื่องจากแป้งที่ได้จากธรรมชาติมีคุณสมบัติที่เฉพาะตามองค์ประกอบและโครงสร้างของแป้ง จึงทำให้การใช้งานค่อนข้างจำกัด ทำให้เกิดคุณลักษณะที่ไม่เหมาะสมหรือตรงตามที่ต้องการของผลิตภัณฑ์ เช่น ค่าพีเอช (pH) อุณหภูมิ แรงเฉือน นอกจากนี้ แป้งที่ได้จากธรรมชาติยังไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้อง มีความคงตัวต่อการไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) ด้วยเอนไซม์ และไม่มีคุณสมบัติเฉพาะ (functional properties) ที่จะทำให้แป้งสามารถใช้งานได้เหมาะสมตามผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการดัดแปรแป้งเพื่อสามารถใช้แป้งได้เหมาะสมกับความต้องการจึงมีศึกษามากขึ้น การดัดแปรแป้งทำได้โดยการทำลายโครงสร้างธรรมชาติของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีเปลี่ยนไป และมีคุณสมบัติเฉพาะตามที่ต้องการของการผลิตนั้นๆ เช่น มีความสามารถในการละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิห้อง มีความหนืดลดลง มีความคงตัวต่อความร้อน กรดและแรงเฉือน โดยวิธีการดัดแปรแป้งโดยทั่วไปนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการทางเคมีและวิธีการทางกายภาพ [3] ซึ่งรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

2.4.1 การดัดแปรแป้งโดยวิธีการทางเคมี [39]

การดัดแปรแป้งโดยวิธีทางเคมีนั้นมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแป้งที่ต้องการและวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน ส่วนใหญ่วิธีดัดแปรแป้งจะใช้แป้งในรูปแบบสารแขวนลอยทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งที่พื้นผิวของส่วนผลึก (ส่วนที่อะไมโลสและอะไมโลเพกทินจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในแนวรัศมี) และภายในส่วนอสัณฐาน (ส่วนที่ไม่เป็นผลึกประกอบไปด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพกทิน) โดยเม็ดแป้งยังไม่แตก สารเคมีที่ใช้มีหลายชนิดทำให้สมบัติแตกต่างกันโดยการดัดแปรแป้งมีวิธีการหลายวิธีโดยมีตัวอย่างดังนี้

1. การดัดแปรแป้งด้วยกรดอนินทรีย์ (Acid-modified starch) เช่น กรดเกลือหรือกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) จะใช้แป้งผสมน้ำแล้วเติมกรดเกลือหรือกรดซัลฟูริกโดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Gelatinization) ทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสโมเลกุลของแป้งให้เล็กลง โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นบริเวณอสัณฐาน ของแป้ง จึงทำให้เกิดสัดส่วนของบริเวณที่เป็นผลึกเพิ่มขึ้น โดยที่เม็ดแป้งยังไม่แตก ทำให้ได้แป้งที่มีคุณสมบัติคือ มีความหนืดลดลง อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น การคั้นตัวของแป้งเพิ่มขึ้น จึงทำให้เพิ่มความเข้มข้นของแป้งในกระบวนการผลิตได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ผลิตภัณฑ์มีการคงรูปได้ดีขึ้น จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตฟู้ด เพราะมีความหนืดต่ำทำให้หยอดพิมพ์ได้ง่ายและคั้นตัวได้ดี นอกจากนี้ยังใช้ในการเคลือบกระดาษและเส้นด้าย

2. การดัดแปรแป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch) เป็นการทำให้แป้งอยู่ในรูปสารแขวนลอยทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite) หรือ แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Calcium hypochlorite) เป็นต้น จะทำให้สารเกิดปฏิกิริยาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 ได้แอลดีไฮด์ (Aldehyde) และไดคาร์บอกซิล (di-carboxyl) มีผลทำให้แป้งมีประจุลบเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีจำนวนหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการคั้นตัวของแป้งเปียกลดลง มีการพองตัวของเม็ดแป้งลดลง จึงทำให้ความหนืดลดลง อุณหภูมิที่ใช้ในการเจลลาติไนเซชันลดลง มีการคั้นตัวลดลงจึงได้แป้งเปียกหรือเจลที่ใสขึ้น ซึ่งแป้งชนิดนี้จะใช้ในการผลิตหมากฝรั่ง ลูกกวาด ทอฟฟี่และส่วนผสมของซูบักกิ่งสำเร็จ เนื่องจากสามารถดูดน้ำได้เร็ว เพราะสมบัติการชอบน้ำของหมู่คาร์บอกซิล นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดเกาะและเคลือบผิวกระดาษให้เรียบ รวมถึงเคลือบเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทำให้เส้นใยลื่นและยืดหยุ่น

3. การทำแป้งครอสลิงค์ (cross-linking) เป็นการทำให้โมเลกุลของแป้งเกาะเกี่ยวกันด้วยพันธะที่แข็งแรงขึ้น เช่น เดิมแป้งเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แต่เมื่อมีการใช้สารเคมีชนิดต่างๆในการดัดแปร ทำให้โมเลกุลของแป้งที่ได้เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) แทน แป้งครอสลิงค์มีหลายชนิด เช่น ไดสตาร์ชอะดิเพต (Distarch adipate) เนื่องจากใช้สารเคมีกรดอะดิเพต (Adipate acid) หรือไดสตาร์ชฟอสเฟต (Distarch phosphate) เนื่องจากใช้สารเคมีฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ (Phosphorus oxychloride) เป็นต้น การที่โมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมกันด้วยพันธะที่แข็งแกร่งขึ้น ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินเซชันที่สูงขึ้น แป้งเปียกมีความต้านทานต่อกรดและแรงเฉือนเพิ่มขึ้น จึงเหมาะสำหรับการใช้ในอาหารที่มีสภาพเป็นกรดและใช้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน เช่น ไล้พายผลไม้ น้ำสลัด เป็นต้น

4. การทำแป้งที่มีความคงตัวสูง (Stabilized starch) เป็นการดัดแปรโดยปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน (Etherification) ได้สตาร์ชอีเทอร์และการดัดแปรโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) ได้สตาร์ชเอสเทอร์ สตาร์ชอีเทอร์มี 3 ชนิด คือ ไฮดรอกซีแอลคิลสตาร์ช เป็นแป้งที่ไม่มีประจุ คาร์บอกซีเมทิลสตาร์ช เป็นแป้งที่มีประจุลบ มีสมบัติพองตัวได้ดีในน้ำเย็น และมีความคงตัวคือ เกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ต่ำ แม้ในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่น การแช่เย็นหรือการแช่แข็ง จึงนิยมใช้เป็นสารให้ความเข้มข้นและครีมเทียม และแคทไอออนิกสตาร์ช (Cationic starch) เป็นแป้งที่มีประจุบวก มีสมบัติคือพองตัวได้ดีในน้ำเย็น มีการคืนตัวต่ำและเกิดพันธะกับประจุลบของเซลลูโลสได้ดีเนื่องจากเป็นประจุบวก จึงใช้มากในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อเพิ่มความเหนียวและทนต่อการขูด การแทรกซึมของของเหลว ส่วนสตาร์ชเอสเทอร์ส่วนมากผลิตเป็นสตาร์ชอะซิเตทและสตาร์ชฟอสเฟต มีสมบัติคือ มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินเซชันต่ำ แป้งเปียกคงตัวได้ดีในอุณหภูมิต่ำ เช่นการแช่เย็นหรือแช่แข็ง จึงใช้เป็นสารให้ความเข้มข้น เช่น ใช้ผลิตซอสข้น มายองเนสและใช้ในอาหารแช่แข็ง นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สิ่งทอและกาว

2.4.2 การดัดแปรแป้งโดยวิธีการทางกายภาพ

การดัดแปรแป้งโดยวิธีทางกายภาพเป็นวิธีการดัดแปรแป้งที่ไม่ได้ใช้สารเคมีใดๆเพิ่มเติมระหว่างกระบวนการดัดแปรแป้ง แต่วิธีดัดแปรทางกายภาพใช้ความร้อน ความดัน แรงเฉือน และความชื้น เท่านั้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ 2 ลักษณะ คือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของแป้ง และการทำลายโมเลกุลแป้ง [4] การดัดแปรแป้งด้วยวิธีธรรมชาติที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มี 3 วิธี ดังอธิบายต่อไปนี้

1. ปริเจลลาติไนซ์สตาร์ช (Pregelatinized starch) เป็นการใช้ความร้อนแก่น้ำแป้งจนเม็ดแป้งเกิดการพองตัวสูงสุดแล้วทำให้แห้ง วิธีการคือ นำแป้งธรรมชาติหรือแป้งดัดแปรมาต้มกับน้ำให้สุก (Heat moisture treatment) หลังจากนั้นนำไปทำให้แห้งอีกครั้ง แป้งดัดแปรชนิดนี้ถูกนำไปใช้ผสมในอาหารปรุงสำเร็จประเภทละลายได้ทันที เช่น ซุป พุดดิ้ง ส่วนผสมของไล้พาย ข้อดีของปริเจลลาติไนซ์สตาร์ช คือ กระจายตัวได้ดีในน้ำเย็น สามารถรักษากลิ่นของอาหารให้ไม่หายไปเนื่องจากไม่ต้องผ่านความร้อนอีกครั้ง [3]

2. การใช้แรงกลและความร้อนสูง หรือที่เรียกว่า เอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) แป้งที่ได้จากกระบวนการนี้จะสุกง่ายเช่นเดียวกัน อีกวิธีคือการใช้ความร้อนไม่สูงมากคือความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินเซชัน แต่ใช้ร่วมกับความชื้น โดยถ้าใช้ความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 35 เรียกว่าวิธี heat moisture treatment แต่ถ้าใช้ความชื้นสูงกว่าร้อยละ 40 เรียกว่าวิธี annealing แต่วิธีนี้ใช้ความร้อนต่ำกว่าอีกวิธี ซึ่งทำให้ได้แป้งที่มีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินเซชันกว้างขึ้น และมี

การคืนตัวเพิ่มขึ้นมีการนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์จำพวกเส้น เช่น ก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ เป็นต้น เพราะจะได้เส้นที่เหนียวขึ้น

3. การผสม (Mixing) เช่น การนำแป้งชนิดต่างๆ มาผสมกันเพื่อให้มีคุณภาพดีขึ้น เช่น การทำขนมขึ้น มีการใช้แป้งข้าวเจ้าผสมกับแป้งมันสำปะหลัง เพราะแป้งข้าวเจ้าทำให้เกิดเจลที่คงรูป แต่ความเหนียวนุ่มและความใสมันวาวมีน้อย เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังแล้วทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสม

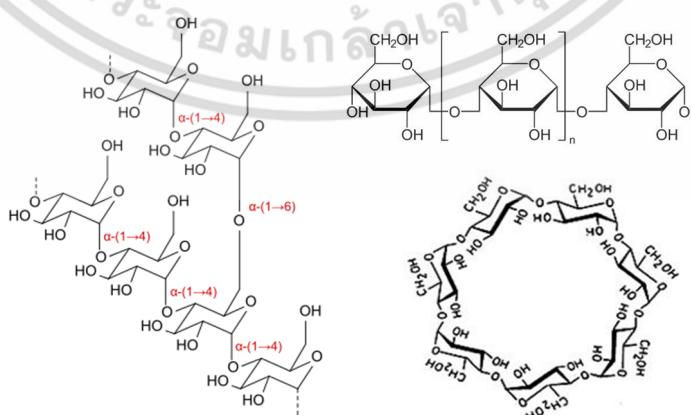
2.5 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเดกซ์ทริน [4]

2.5.1 ประเภทของเดกซ์ทริน

เดกซ์ทริน (Dextrin) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสแป้งบางส่วนด้วยเอนไซม์ กรด หรือความร้อน มีโครงสร้างโมเลกุลทั้งชนิดที่เป็นสายเดี่ยว ชนิดที่มีการแตกกิ่ง และชนิดที่มีโครงสร้างต่อกันเป็นวง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หรือถ้าหากจัดหมวดหมู่ตามกรรมวิธีการผลิตจะแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักคือ

1. เดกซ์ทริน ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสแป้งโดยเอนไซม์อะไมเลส
2. เดกซ์ทริน ที่ผลิตจากการไฮโดรไลซิสแป้งด้วยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ Bacillus
3. เดกซ์ทริน ที่ผลิตจากการไฮโดรไลซิสสารแขวนลอยของแป้งด้วยกรด
4. เดกซ์ทรินที่ผลิตโดยการใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับกรดเรียกว่าไฟโร-

เดกซ์ทริน โดยใช้แป้งแห้งซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเดกซ์ทรินส่วนใหญ่ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิดคือ เดกซ์ทรินขาว เดกซ์ทรินเหลือง และบริทซ์กัม ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเดกซ์ทริน [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมการผลิตเดกซ์ทริน จะให้ความร้อนแก่แป้งที่มีความชื้นเริ่มต้นน้อยกว่า 15% ในรูปแบบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิ 100 ถึง 200 °C ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเล็กน้อย ขั้นตอนของการผลิตเริ่มจากการปรับค่ากรด (Acidification) การลดความชื้น (Pre-drying) การให้ความร้อนแก่แป้งโดยวิธีการคั่ว (Dextrinization) และทำให้วัสดุเย็น (Cooling) ซึ่งปริมาณสารเคมีและอุณหภูมิที่ใช้ในการคั่วจะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยเดกซ์ทรินที่ได้จากการผลิตโดยวิธีเบื้องต้นมี 3 ชนิด ได้แก่ เดกซ์ทรินขาว เดกซ์ทรินเหลือง และบริติชกัม (British gum)

เดกซ์ทรินขาวทำได้โดยให้ความร้อนประมาณ 70 ถึง 120 °C ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กรดเกลือ ใช้เวลาประมาณ 4 ถึง 9 ชั่วโมง ความสามารถในการละลายมีค่าประมาณ 10 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ สีของเดกซ์ทรินที่ได้มีสีขาวถึงครีม

เดกซ์ทรินเหลืองใช้เวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนมากกว่าเดกซ์ทรินขาว ในการให้ความร้อนใช้เวลาประมาณ 5 ถึง 15 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อน 150 ถึง 200 °C ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเล็กน้อย สีของเดกซ์ทรินที่ได้มีสีเหลืองถึงเหลืองเข้ม สารละลายที่ได้ค่อนข้างข้น ความสามารถในการละลายประมาณ 95 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์

บริติชกัมทำโดยการให้ความร้อนแก่แป้งที่อุณหภูมิสูง 170 ถึง 220 °C ใช้เวลา 10 ถึง 20 ชั่วโมง อาจจะใช้หรือไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สีของเดกซ์ทรินที่ได้มีสีเหลืองเข้ม สารละลายที่ได้มีค่าความหนืดต่ำที่สุด



รูปที่ 2.10 เดกซ์ทรินขาว เดกซ์ทรินเหลือง และบริติชกัม [41]

คุณลักษณะของเดกซ์ทรินที่ต้องการสามารถกำหนดได้โดยอาศัยปัจจัยเพียงไม่กี่อย่างเช่น อุณหภูมิ เวลา ปริมาณสารเคมีและ ชนิดของแป้งที่นำมาใช้ โดยลักษณะทางกายภาพของแป้งและวิธีการให้ความร้อนนั้นจะเป็นตัวบ่งชี้คุณลักษณะของเดกซ์ทรินที่จะได้รับ ดังนั้นจึงไม่สามารถระบุชนิดของเดกซ์ทรินได้อย่างละเอียด ต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น การผลิตเดกซ์ทรินจึงเปรียบเสมือนงานศิลปะมากกว่าวิทยาศาสตร์ โดยรูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของเดกซ์ทรินขาว เดกซ์ทรินเหลือง และบริติชกัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การใช้ประโยชน์จากเดกซ์ทริน

คุณสมบัติทั่วไปของเดกซ์ทรินคือ เดกซ์ทรินมีความหนืดน้อยกว่าแป้งและละลายได้ดีในน้ำเย็น เดกซ์ทรินถูกนำไปใช้ในการผลิตอาหารและผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เช่น การผลิตบรรจุภัณฑ์จากกระดาษ การผลิตกาวติดแอสแตมป์ เป็นต้น [42] เนื่องจากคุณสมบัติของเดกซ์ทรินสามารถดัดแปลงได้หลากหลายตามวิธีการผลิตเดกซ์ทริน



รูปที่ 2.11 กาวเดกซ์ทริน [43]

เดกซ์ทรินถูกนำไปใช้ในการผลิตอาหาร โดยทำหน้าที่เป็นสารที่ใช้เจือปนอาหาร ได้แก่ อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ช่วยเพิ่มแรงตึงผิวของอาหาร ป้องกันการแยกชั้นของอาหาร สารเพิ่มความข้นหนืด (Thickener) เป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ทำหน้าที่เพิ่มความข้นหนืดให้อาหารเหลว เช่น ซุป ซอส เป็นต้น และ สารที่ทำให้คงตัว (Stabilizer) เป็นไฮโดรคอลลอยด์ทำให้อาหารมีความคงตัว ป้องกันการแยกชั้นของเหลวป้องกันการสูญเสียกลิ่นรส และคุณค่าทางโภชนาการ [44]

การผลิตกล่องกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้เดกซ์ทรินมากที่สุด โดยใช้ในการผลิตกล่องที่มีลักษณะเป็นลูกฟูกและบรรจุภัณฑ์ที่เป็นกระดาษ เดกซ์ทรินจะเคลือบเป็นชั้นบางบนผิวของกระดาษลูกฟูกจากนั้นลูกฟูกจะถูกนำไปประกบติดกันโดยลูกกลิ้ง ผลจากการเจลาติไนเซชันจะทำให้กระดาษลูกฟูกติดกันอย่างหนาแน่น โดยรูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของกาวเดกซ์ทรินที่นำไปใช้ในการผลิตกล่องกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

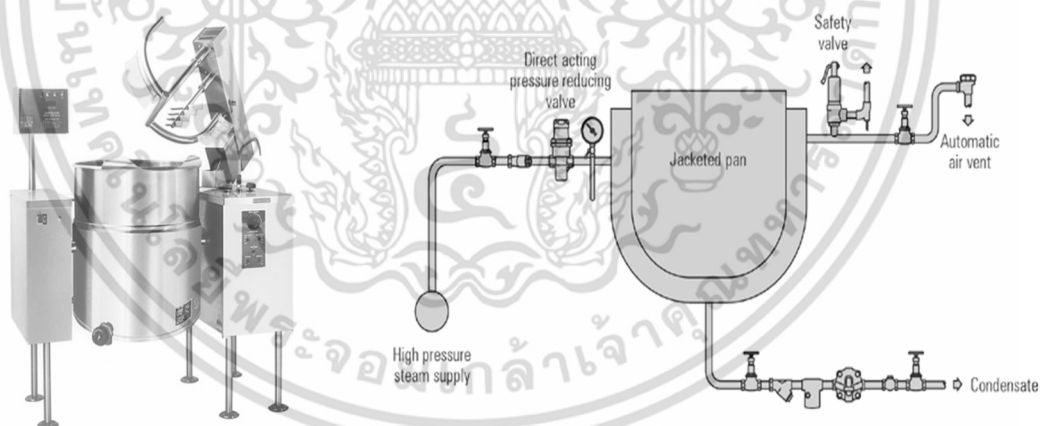
กาวแอสแตมป์และฉลาก เดกซ์ทรีนถูกนำไปใช้ในการเคลือบบนพื้นผิวที่แห้ง เนื่องจาก เดกซ์ทรีนมีคุณสมบัติเหมาะสมคือ สามารถคงรูปได้ในสถานะของแข็งและสามารถคืนตัวในรูปเจลได้ดี [4]

การผลิตผ้า เดกซ์ทรีนถูกนำไปใช้ในการเคลือบเส้นใยผ้า เพื่อให้เส้นใยมีความลื่น และเพิ่มความยืดหยุ่นของเส้นใย นอกจากนี้เดกซ์ทรีนยังถูกนำไปใช้เป็นตัวช่วยให้สติดกับเส้นใยผ้า ได้มากขึ้นในขั้นตอนการย้อมสีผ้า [45] นอกจากนี้เดกซ์ทรีนยังถูกนำไปใช้ในการผลิตสีน้ำ ดอกไม้ไฟ การหล่อโลหะ รวมถึงอุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่ [4]

2.5.3 เครื่องจักรสำหรับการผลิตเดกซ์ทรีน

เครื่องจักรสำหรับการผลิตเดกซ์ทรีนนั้นโดยทั่วไปแล้วจะเป็นเครื่องจักรที่ออกแบบอย่างง่าย โดยให้ความร้อนในระบบปิด เพราะแป้งมีการฟุ้งกระจายเนื่องจากมีขนาดเล็ก

1. หม้อแลกเปลี่ยนความร้อน (Jacketed pan) โดยมีที่คนหรือใบกวน ที่วางระหว่างชั้นของภาชนะใช้เพื่อบรรจุตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น น้ำมันหรือไอน้ำ โดยมีใบกวนที่แกนกลาง ทำหน้าที่คนวัสดุในภาชนะให้เข้ากัน เพื่อความสม่ำเสมอในการให้ความร้อน การให้ความร้อนแก่แป้งเพื่อผลิตเป็นเดกซ์ทรีนในระดับอุตสาหกรรม ส่วนมากจะใช้อุปกรณ์ชนิดนี้ในการผลิตเดกซ์ทรีน [4] โดยรูปที่ 2.12 แสดงลักษณะและส่วนประกอบของหม้อแลกเปลี่ยนความร้อน

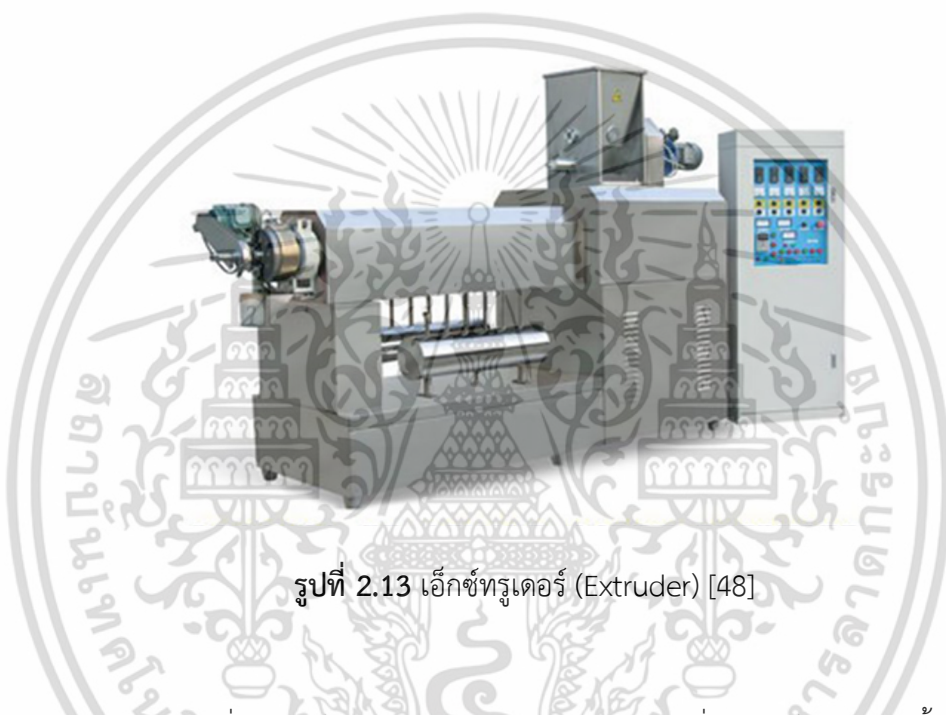


รูปที่ 2.12 หม้อแลกเปลี่ยนความร้อน (Jacketed pan) [46]

2. เอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) แสดงในรูปที่ 2.13 เอ็กซ์ทรูเดอร์เป็นเครื่องจักรในการให้ความร้อน มีลักษณะกลวง วางตัวตามในแนวนอน ภายในมีสกรูซึ่งจะถูกหมุนด้วยมอเตอร์ที่ปรับความเร็วรอบได้ อาจเป็นสกรูเดี่ยวหรือเกลิยวคู่ ช่วงต้นของสกรูที่มีความสูงของครีบกวาดมากจะทำหน้าที่ลำเลียงวัตถุดิบป้อนเข้าสู่ภายใน และจะถูกคลุกเคล้าให้ผสมกันในช่องว่างระหว่างครีบกวาดกับกระบอก เมื่ออาหารลำเลียงมาถึงช่วงที่ระยะครีบกวาดสั้นลงจะถูกบีบให้เคลื่อนที่อยู่ที่ว่างลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำมาใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

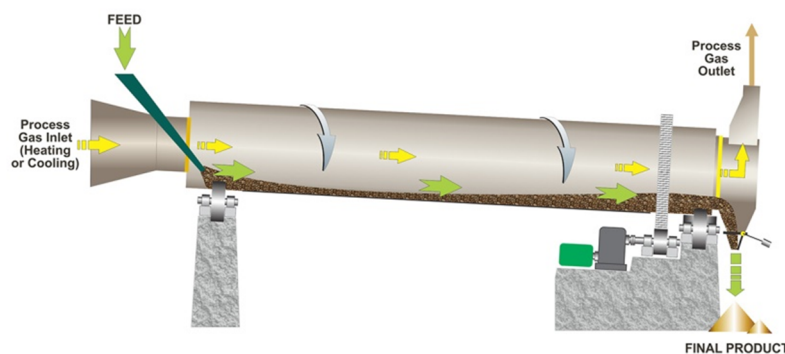
ความดันเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงเฉือน (shear force) ระหว่างวัตถุดิบเอง และระหว่างวัตถุดิบกับพื้นผิวของกระบอกและสกรู เกิดการนวดให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน และอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นจากแรง และความดันที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้โครงสร้างของอาหารเปลี่ยนแปลงไป เช่น แป้งเกิดเจลาตินไนซ์ (gelatinized starch) เม็ดแป้งพองตัวขึ้น โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติ (protein denaturation) ทำให้โมเลกุลคลายตัว (unfolding) กลูเตน (gluten) รวมกับน้ำ เกิดเป็นโด (dough) ในช่วงนี้ อาจมีการให้ความร้อนจากภายนอกพร้อมด้วย เพื่อให้อาหารสุกอย่างสมบูรณ์ เรียกว่า cooking extruder เป็นการให้ความร้อนสูงขึ้นภายในระยะเวลาสั้น (high temperature short time) [47]



รูปที่ 2.13 เอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) [48]

3. เครื่องอบแห้งแบบทอหมุน (rotary drier) เครื่องอบแห้งประเภทนี้ประกอบด้วยตัวถังอบ เป็นรูปทรงกระบอกวางนอน อาจวางเอียงเล็กน้อย วัสดุที่ต้องการอบจะถูกป้อนเข้าด้านบนของเครื่อง ลมร้อนจะถูกเป่าเข้าบริเวณแกนกลางของเตาอบ หรือผ่านทางด้านล่าง ผ่านชั้นของผลิตภัณฑ์ ถังอบมีกลไกให้หมุนรอบตัวอย่างช้าๆ หรือหมุนแบบเป็นช่วงๆ ภายในถังอาจติดตั้งครีบทักวัสดุขึ้นไป แล้วโปรยจากด้านบน เมื่อถึงหมุนวัสดุเคลื่อนที่และจะคลุกเคล้ากันตลอดเวลา ทำให้การอบแห้งสม่ำเสมอ วัสดุที่อบแห้งเสร็จแล้วจะเคลื่อนที่ออกทางช่องเปิดด้านล่าง ประสิทธิภาพของเครื่องอบมีผลมาจากจัดทิศทางลมร้อน มีการกระจายลมร้อนให้สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเตา การระบายความชื้นออกจากถังอบ เครื่องอบแห้งแบบถังหมุน เหมาะสำหรับการทำแห้งอาหาร ที่ต้องการกำลังการผลิตสูง [49] ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบทอหมุนแสดงในรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 เครื่องอบแห้งแบบทอหมุน (rotary drier) [50]

2.6 การวัดค่าความหนืดของแป้ง [37]

เมื่ออุณหภูมิของน้ำแป้งสูงกว่าช่วงอุณหภูมิเจลลิตินในเซชันเม็ดแป้งแต่ละเม็ดจะเกิดเจลลิตินในเซชัน และพองตัวเต็มที่อย่างอิสระ โมเลกุลของแป้งที่อิมมูน้ำเต็มที่นี่จะแยกตัวออกจากพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้ง แล้วกระจายสู่สารละลายรอบๆ ทำให้เม็ดแป้งที่พองตัวแตกได้ยังขึ้นอยู่กับการผสมที่รุนแรง ความหนืด paste จากแป้งที่เกิดขึ้นเนื่องจากสมบัติของเม็ดแป้งที่พองตัวแล้วยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาภายในระหว่างโมเลกุลของแป้งสายสั้นๆ ที่ละลายน้ำออกมากับส่วนของเม็ดแป้งที่กระจายตัวอยู่ โดยทั่วไปความหนืดของ paste จากแป้งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงยอดสูงสุดแล้วลดลงอย่างช้าๆ ขณะให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ

วิธีวัดความหนืด วิธีการตรวจวัดความหนืดสามารถกระทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดต่างๆ กันดังนี้

2.6.1 เครื่องมือวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer)

เครื่องมือวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ แสดงในรูปที่ 2.15 เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ การทำงานของเครื่องเกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลววัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่ แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัวโดยแสดงด้วยเข็มสีแดงบนหน้าปัดเครื่องหรือหน้าจอดีจิตอล ค่านี้อ่านด้วยค่าคงที่ตามความเร็ว ขนาดและชนิดของเครื่องนี้จะมีหน่วยความหนืดของของเหลวเป็นเซนติพอยส์ (centipoise) เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ใช้ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร มีหัววัดหลายขนาดสำหรับอาหารที่มีความหนืดต่ำจนถึงอาหารที่มีความหนืดสูง เหมาะในการวัดอาหารที่เป็นของเหลวนิวโตเนียนหรือของเหลวนอนนิวโตเนียนที่ไม่มีขึ้นอาหารผสมอยู่ ในกรณีที่ใช้วัดความหนืดของของเหลวนอนนิวโตเนียน ความหนืดที่วัดได้จะเป็นความหนืดนิวโตเนียนสมมูล (Equivalent Newtonian viscosity) ซึ่งมีค่าคงที่ที่ความเร็วรอบของการหมุนของหัววัดหนึ่งๆ และอาจแปรตามเวลาในการวัดหากตัวอย่างนั้นเป็นของเหลวนอนนิวโตเนียนที่ขึ้นกับเวลาคำนวณความหนืดของของเหลวได้จากสมการที่ 2.1 [51]

$$\eta = \frac{3}{32Mr^2\omega} \quad (\text{Eq 2.1})$$

เมื่อ	M	คือ	Torque หรือแรงบิด
	ω	คือ	ความเร็วรอบหัวหมุนในหน่วยเรเดียนต่อวินาที
	r	คือ	รัศมีของหัววัด

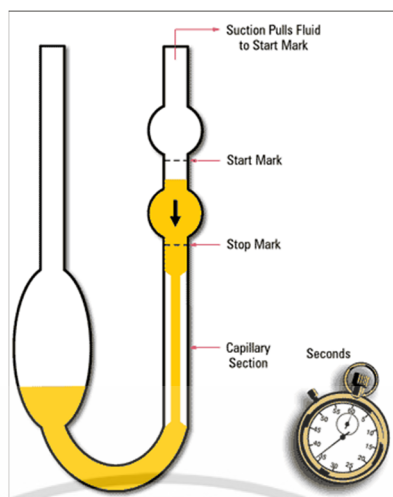


รูปที่ 2.15 เครื่องมือวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ [52]

2.6.2 เครื่องวัดความหนืดแบบหลอด (Capillary viscometer)

สามารถใช้วัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ เท่านั้น มีหน่วยของความหนืดเป็น mPa·s หลักการทำงานของเครื่องวัดความหนืดแบบหลอดแสดงในรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 เครื่องวัดความหนืดแบบหลอด (Capillary viscometer) [53]

2.6.3 เครื่องบราเบนเดอร์อะไมโลกราฟ (Brabender amylograph)

เครื่องบราเบนเดอร์อะไมโลกราฟ แสดงในรูปที่ 2.17 การวัดความหนืดโดยใช้บราเบนเดอร์อะไมโลกราฟเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลาย หลักการทำงานคือการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งในระหว่างการทำให้ร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น ติดตามผล และแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ได้หน่วยความหนืดเป็น Brabender Unit (BU) สามารถเปลี่ยนเป็น centipoise ได้โดยเทียบความหนืดของสารละลายแป้งสุก 5% ความหนืด 500 BU เท่ากับ 2,700 centipoise [54]



รูปที่ 2.17 เครื่องบราเบนเดอร์อะไมโลกราฟ (Brabender amylograph) [55]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 Rapid Visco Analyzer (RVA)

Rapid Visco Analyzer แสดงในรูปที่ 2.18 Rapid Visco Analyzer เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องพิจารณาความหนืดขณะที่ให้ความร้อน คุณสมบัติพิเศษคือ มีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ สามารถทำให้ร้อน และเย็นได้อย่างแม่นยำ และรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้จึงทำให้สามารถหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting curve) ได้ภายในเวลาสั้น (13 นาที) เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนที่ดีกว่า และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า ค่าที่เครื่องแสดงผลอ่านได้บนจอคอมพิวเตอร์ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ หรือ RVU



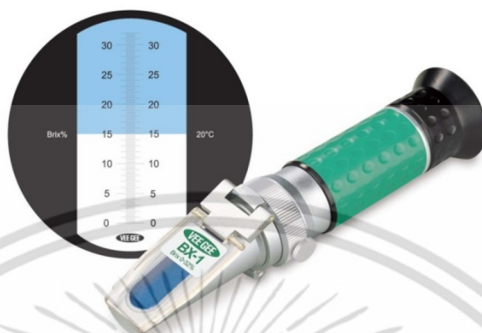
รูปที่ 2.18 Rapid Visco Analyzer (RVA) [56]

2.7 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในอาหาร (total soluble solid) หมายถึงปริมาณสารประกอบชนิดต่างๆ ที่ละลายได้อย่างสมบูรณ์ในตัวทำละลายที่มีอยู่ในอาหารซึ่งส่วนใหญ่คือน้ำ สารละลายที่ได้มักจะเป็นน้ำตาลและกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ รวมทั้งกรดอะมิโนและกรดแอสคอร์บิก หรือวิตามินซีด้วย การวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในอาหารนิยมวัดด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์แบบ Hand Refractometer ในขณะที่การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งที่ได้รับความร้อนเป็นการบ่งบอกถึงปริมาณของแป้งที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความร้อนและโมเลกุลเปลี่ยนเป็นน้ำตาล [57]

Refractometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการหักเหของแสง ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางกายภาพของสารนั้น ที่สัมพันธ์กับดรรชนีหักเหของแสง โดยมีหลักการคือ เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลางหนึ่ง เช่น จากอากาศสู่น้ำ จากน้ำสู่คริสตัล โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของตัวแปรที่มีผล เช่น มุม ความเร็ว หรือดัชนีหักเหของแสงของตัวกลาง เป็นต้น การตรวจสอบค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) มี 2 ระบบ คือ ระบบการส่องผ่านของแสง (transparent system) และ ระบบการสะท้อนของแสง (reflection system) โดย Refractometer เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้ระบบการสะท้อนของแสงคือ Hand-Held Refractometer แสดงในรูปที่ 2.19 และ Abbe Refractometer ส่วน Refractometer ที่ใช้ระบบการส่องผ่านคือ Digital Refractometer แสดงในรูปที่ 2.20 [58]



รูปที่ 2.19 Hand-Held Refractometer [59]



รูปที่ 2.20 Digital Refractometer [60]

ค่าของ Brix (%) จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในสารละลายน้ำ (water solution) ปริมาณของแข็งที่สามารถละลายได้ทั้งหมด (soluble solid) คือ ผลรวมของของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด เช่น น้ำตาล เกลือ โปรตีน กรด เป็นต้น และค่าที่อ่านได้จะออกมาในรูปผลรวมของปริมาณของแข็งทั้งหมด โดยพื้นฐานแล้ว Brix (%) จะทำการสอบเทียบ (calibration) กับสารละลายน้ำตาลอ้อย (cane sugar solution) 100 กรัม ดังนั้นเมื่อมีการวัดสารละลายน้ำตาล ค่า Brix (%) ที่ได้จะเป็นความเข้มข้นของน้ำตาลที่แท้จริง สำหรับสารละลายอื่นๆ ที่มีหลายองค์ประกอบ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเทียบกลับเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่แท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การวิเคราะห์สี [61]

สีเป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของวัสดุเกษตรได้ง่ายที่สุดวิธีหนึ่งใน การอธิบายสีของวัตถุด้วยคำพูดมาตรฐานการบรรยายลักษณะสีอาจจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ ประสบการณ์ ลักษณะทางกายภาพของตาผู้บรรยาย ลักษณะแสงที่ตกกระทบ เป็นต้น ดังนั้นการวัด และการบรรยายสีในเชิงวิชาการจึงต้องมีการจัดมาตรฐานเพื่อเป็นการลดความไม่เป็นกลาง (Bias) ของผู้บรรยายสีของวัสดุนั้นการวิเคราะห์สีโดยเครื่องวัดสี เช่น Hunter lab Spectrophotometer ดังแสดงในรูปที่ 2.21

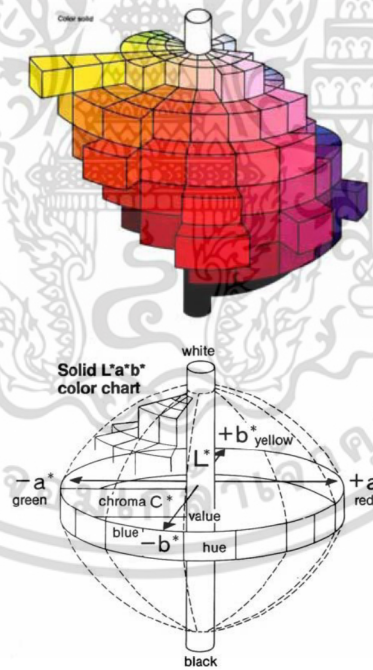
การวัดค่าสีในระบบ CIE ซึ่งเป็นระบบบรรยายสีแบบ 3 มิติ แสดงในรูปที่ 2.22 โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนไปถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงสีแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) โดยนำค่าได้ไปคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมจากสูตร

$$\Delta E = \sqrt{(L_t^* - L_0^*)^2 + (a_t^* - a_0^*)^2 + (b_t^* - b_0^*)^2} \quad (\text{Eq 2.2})$$

เมื่อ	ΔE	คือ	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม
	L_t^*	คือ	ค่าความสว่างของวัสดุที่เวลาใดๆ
	L_0^*	คือ	ค่าความสว่างของวัสดุเริ่มต้น
	a_t^*	คือ	ค่าความเป็นสีแดงของวัสดุที่เวลาใดๆ
	a_0^*	คือ	ค่าความเป็นสีแดงของวัสดุเริ่มต้น
	b_t^*	คือ	ค่าความเป็นสีเหลืองของวัสดุที่เวลาใดๆ
	b_0^*	คือ	ค่าความเป็นสีเหลืองของวัสดุเริ่มต้น



รูปที่ 2.21 Spectrophotometer (Hunter Lab, MiniScan XE PLUS)



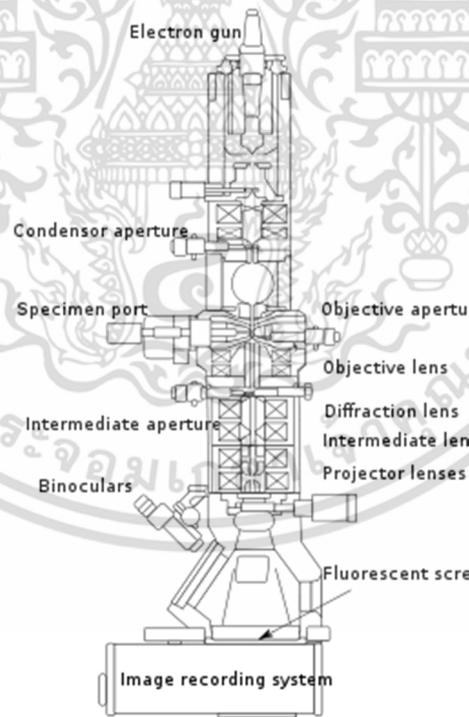
รูปที่ 2.22 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ [61]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การวิเคราะห์ภาพถ่ายอิเล็กตรอนไมโครสโคป [62, 63]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

ส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM แสดงในรูปที่ 2.23 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่า Electron gun อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพเป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (accelerating voltage) ในช่วง 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic Lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 2.23 ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [64]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกเรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron Optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan Coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป

2.10 การให้ความร้อนวัสดุโดยใช้รังสีอินฟราเรด [65, 66]

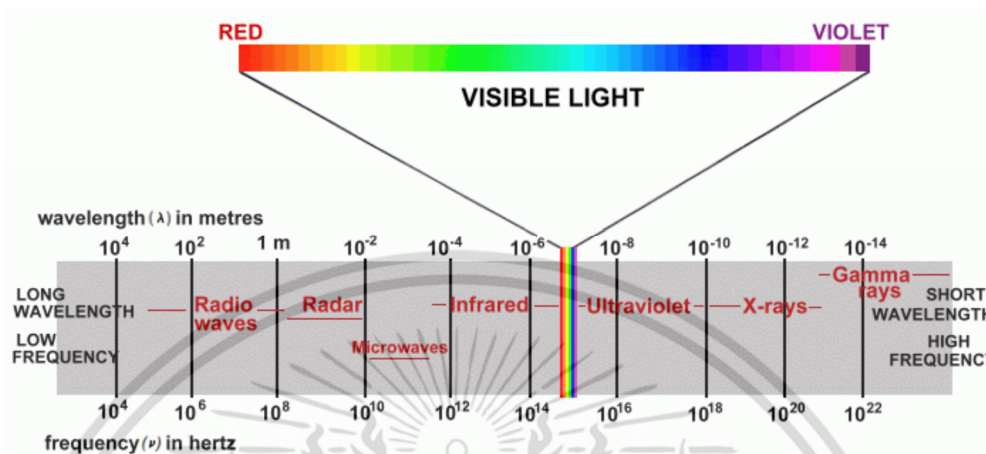
การให้ความร้อนโดยการใช้รังสีอินฟราเรด สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การใช้รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near-infrared) และการใช้รังสีอินฟราเรดไกล (Far-infrared) ตามขนาดความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดที่ใช้คือ 0.75-3.0 mm สำหรับรังสีอินฟราเรดใกล้ และ 25-100 mm สำหรับรังสีอินฟราเรดไกล การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดมีข้อดีเช่น เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุที่ต้องการให้ความร้อนโดยตรงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปยังวัสดุเกิดขึ้นโดยการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนโดยใช้อากาศร้อน ทำให้ไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมมาก และอัตราการให้ความร้อนสูง โดยฟลักซ์ความร้อนในกรณีการให้ความร้อนแบบใช้รังสีอินฟราเรดอาจมีค่าสูงกว่าการให้ความร้อนโดยใช้อากาศร้อนถึง 4 ถึง 6 เท่า การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดมีจุดเด่นในแง่ของการประหยัดพลังงาน

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดอาจเป็นแหล่งกำเนิดเซรามิกส์ซึ่งได้รับความร้อนจนเกิดการเปล่งรังสีออกมา หรืออาจเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าก็ได้ และเนื่องจากฟลักซ์ความร้อนที่สูงมากของรังสีอินฟราเรดอาจทำให้วัสดุไหม้และสูญเสียคุณภาพที่สำคัญได้ จึงต้องทำการควบคุมพลัดซ์ความร้อนที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดโดยใช้อุณหภูมิของวัสดุเป็นตัวแปรควบคุมหลัก [49]

2.10.1 หลักการของอินฟราเรดในอาหาร

แถบสเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้าภายในความยาวคลื่นของอินฟราเรด ที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปอาหารที่ปล่อยออกมาแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000°C จะให้รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น ($0.7\ \mu\text{m}$ ถึง $2\ \mu\text{m}$) ขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ จะให้รังสีอินฟราเรดคลื่นกลาง ($2\ \mu\text{m}$ ถึง $4\ \mu\text{m}$) และคลื่นยาว ($4\ \mu\text{m}$ ถึง $1\ \mu\text{m}$) (ภาพที่ 2.24) รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวจะเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงประมาณ 400°C รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นสั้นไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่อาหารได้มาก จึงเหมาะสำหรับกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นอาหารก่อน อาหารสามารถผ่านขั้นตอน

การทำให้สุกเบื้องต้น เช่น การทำให้เกิดสีน้ำตาล เป็นต้น ซึ่งทำให้ผิวหน้าของอาหารปิดก่อนที่จะเสร็จสิ้นกระบวนการทำให้สุกในชั้นผลิตภัณฑ์อาหาร



รูปที่ 2.24 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [67]

แนวคิดพื้นฐานของการแผ่รังสีอินฟราเรดคือ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่สูง การแทรกซึมความร้อนโดยตรงเข้าสู่อาหาร การควบคุมกระบวนการเร็ว และไม่มีการให้ความร้อนแก่อากาศที่อยู่รอบๆ คุณภาพเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานอุดมคติสำหรับการให้ความร้อน ตัวให้รังสีอินฟราเรด คือ เรดิเอเตอร์ (radiator) ซึ่งมีหลายชนิดและมีรูปร่างต่างๆกัน เช่น gas heated radiators (ให้รังสีคลื่นยาว) และ electrically heated radiators (อาจเป็น ceramic heater) ที่ให้รังสีคลื่นยาว หรือ quartz tube heaters (ให้รังสีคลื่นสั้นและปานกลาง)

เมื่อคลื่นอินฟราเรดกระทบกับวัตถุ ก็จะสะท้อน (R) หรือส่งผ่าน (T) หรือดูดซับ (A) เมื่อรังสีถูกดูดซับก็จะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนและอุณหภูมิของวัตถุก็เพิ่มขึ้น โดยที่ความลึกของการทะลุทะลวงมีความสำคัญสำหรับการให้ความร้อนแก่อาหาร อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุที่ให้และรับความร้อน คุณสมบัติที่ผิวของวัตถุทั้งสอง และรูปร่างของวัตถุที่ปล่อยและรับ

$$E = R + T + A \quad (\text{Eq 2.3})$$

อัตราการส่งความร้อนจากวัตถุสีดำเป็นสัดส่วนของกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุนั้น ซึ่งคำนวณได้จากสมการ Stefan-Boltzmann ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = \sigma AT^4 \quad (\text{Eq 2.4})$$

เมื่อ	Q	คือ	อัตราการส่งความร้อน (heat emission) (J/s)
	σ	คือ	ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann = 5.7×10^{-8} (J/s.m ² .K ⁴)
	A	คือ	พื้นที่ผิว (m ²)
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K= C+273)

สมการนี้ใช้สำหรับตัวดูดซับที่สมบูรณ์ (perfect absorber) ซึ่งรู้จักกันว่าเป็นวัตถุดำ อย่างไรก็ตาม ตัวทำความร้อนที่เปล่งรังสีมักไม่ใช่ตัวให้รังสี (radiators) ที่สมบูรณ์ และอาหารก็ไม่ใช่ตัวรับที่สมบูรณ์ แม้ว่าสารเหล่านี้จะปล่อยและดูดซับในสัดส่วนคงที่ที่สูงสุดทางทฤษฎีก็ตามด้วยเหตุนี้จึงใช้ความคิดในเรื่องวัตถุดำ และสมการ Stefan-Boltzmann จึงเปลี่ยนเป็น

$$Q = \epsilon \sigma AT^4 \quad (\text{Eq 2.5})$$

เมื่อ	ϵ	คือ	emissivity ของวัตถุดำ มีค่าจาก 0 ถึง 1
-------	------------	-----	--

ค่า emissivity ของสารต่างๆ จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิของวัตถุดำและความยาวคลื่นของรังสีที่ปล่อยออกมา

ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดซับโดยวัตถุดำจะเรียกว่า absorptivity (α) และเทียบเท่ากับ emissivity รังสีที่ไม่ถูกดูดซับจะถูกสะท้อนกลับและเรียกว่า reflectivity ($1-\alpha$) ปริมาณของพลังงานที่ถูกดูดซับและระดับการให้ความร้อน มีค่าตั้งแต่ 0 จนถึงการดูดซับสมบูรณ์ซึ่งกำหนดจากองค์ประกอบของอาหารที่ดูดซับรังสีในระดับต่างๆ กัน และความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมา ความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดหาได้จากอุณหภูมิของแหล่งให้รังสี อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะให้ความยาวคลื่นที่สั้นลงและความลึกของการทะลุทะลวงมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนจากผิวที่ร้อนกว่า (1) ไปยังผิวที่เย็นกว่า (2) หรืออัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิไปยังอาหารสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = \epsilon \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{Eq 2.6})$$

เมื่อ	T_1	คือ	อุณหภูมิของตัวปล่อยรังสี (emitter)
	T_2	คือ	อุณหภูมิของตัวดูดซับหรืออาหาร (absorber)

อาหารเป็นสารที่ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน สมบัติการดูดซับอินฟราเรดของอาหารจึงอธิบายได้ไม่ง่าย สมบัติการแทรกซึม (penetration properties) มีความสำคัญเช่นกัน ความลึกของการแทรกซึมนิยามว่าเป็น 37% ของพลังงานรังสีที่ไม่ได้ดูดซับไว้ สำหรับคลื่นสั้น ความสามารถในการแทรกซึมของคลื่นเป็น 10 เท่าของคลื่นยาว ความสามารถในการแทรกซึมโดยตรงของรังสีอินฟราเรดทำให้ค่าพลังค์ของพลังงานเพิ่มขึ้นโดยไม่ทำให้ผิวหนังอาหารไหม้ และช่วยลดเวลาในการให้ความร้อนที่กระบวนการให้ความร้อนทั่วไปต้องใช้ ความยาวคลื่นสั้นจึงเป็นสิ่งที่สนใจที่สุดเนื่องจากสามารถผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นชอบที่จะเผยแพร่เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปในอาหารได้ลึกกว่า ส่วนรังสีคลื่นยาวมีความสำคัญในแง่ปริมาณให้พลังงานที่ถ่ายเทไปยังผิวอาหาร

2.11 ผลของการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้ง

การให้ความร้อนแก่แป้งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดแป้ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้ง ได้แก่ ความหนืด ค่าการละลาย ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม เป็นต้น

เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนสูงเป็นระยะเวลาสั้นจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเม็ดแป้ง เนื่องจากความร้อนส่งผลให้พื้นผิวของเม็ดแป้งที่ได้รับความร้อนเกิดรอยแตก และบางส่วนเกิดการแยกออกจากกัน ทำให้เม็ดแป้งมีขนาดเล็กลง โดย Katz [68] รายงานว่าการให้ความร้อนแป้งสาลีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 °C ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนมากกว่า 210 °C ทำให้โครงสร้างของแป้งเกิดความเสียหาย

เนื่องจากขนาดของเม็ดแป้งที่ลดลงภายหลังจากที่ได้รับความร้อนส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อแป้งพองตัวจะดูดซับน้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งได้น้อยส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลง [37] สอดคล้องกับงานวิจัยของ อโนชา สุขสมบูรณ์ และคณะ [69] ได้ทำการดัดแปรแป้งข้าวเหนียวด้วยรังสีไมโครเวฟเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งดีขึ้น โดยแป้งข้าวเหนียวดัดแปรสตาร์ชด้วยไมโครเวฟมีคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิด เจลาทีไนเซชัน และค่าความแข็งของเจลเพิ่มขึ้น แต่ค่าพารามิเตอร์ด้านความหนืดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวปกติ นอกจากนี้ยังได้ทำการดัดแปรด้วยความร้อนร่วมกับความชื้น ทำให้แป้งดัดแปรสตาร์ชมีอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาทีไนเซชันสูงขึ้น แต่มีค่ากำลังการพองตัว และค่าความหนืดสูงสุดลดลงจากแป้งที่ไม่ดัดแปร ส่วนแป้งที่ดัดแปรแป้งด้วยรังสียูวี โดยการปรับความชื้นแป้ง และฉายรังสียูวี มีค่ากำลังการพองตัว และอุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลาทีไนเซชัน ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากแป้งที่ไม่ดัดแปร แต่มีความหนืดสูงสุดลดลง

ค่าการละลายของแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนส่งผลให้พันธที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุลของแป้งถูกทำลาย ส่งผลให้ความยาวของพันธะสั้นลงทำให้แป้งละลายน้ำได้ดีขึ้น [70] งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับค่าการละลายของแป้งชนิดต่างๆ ภายหลังจากการดัดแปรสภาพโดยใช้ความร้อนมีหลายตัวอย่าง ได้แก่ Sarifudin and Assiry [71] ได้ทำการทดลองใช้วิธีการ extrusion ในการผลิตเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวโพด โดยใช้ความเร็วของเกลียว 4 ระดับ ได้แก่ 35, 45, 55 และ 65 รอบต่อนาที ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 125, 130 และ 135 °C ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของเกลียวและอุณหภูมิแล้วส่งผลให้ค่าการละลาย (solubility index) เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการรายงานของ Murua et al. [72] ที่รายงานว่า การให้ความร้อนแป้งโดยวิธีการ extrusion อุณหภูมิสูงที่ความชื้นต่ำส่งผลให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้น 60 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้รายงานของ Katz [68] ยังกล่าวถึงค่าการละลายว่าค่าการละลายเกิดการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กน้อยเมื่อแปรงผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 140 °C Noranizan et.al [73] ได้ทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแป้งสาลี, แป้งสาคู, แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง ที่อุณหภูมิ 100, 110 และ 120 °C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ส่งผลให้กำลังการพองตัวและค่าการละลายเพิ่มขึ้น Cerniani [74] รายงานว่าเมื่อทำการให้ความร้อนแป้งที่อุณหภูมิ 100 ถึง 170 °C ส่งผลให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้นจาก 0.22 เปอร์เซ็นต์เป็น 84.47 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เป็นการบ่งบอกถึงปริมาณของแป้งที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความร้อนและโมเลกุลเปลี่ยนเป็นน้ำตาล [57] โดย Sarifudin and Assiry [71] ได้สรุปผลการศึกษ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวโพดว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของเกลียวและอุณหภูมิในกระบวนการ extrusion ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลาย (total soluble solid) มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Katz [68] ยังรายงานผลการศึกษ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ว่าความสามารถในการละลายได้ในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น เมื่อทำการให้ความร้อนแป้งที่อุณหภูมิมากกว่า 180 °C

ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของแป้งหลังจากผ่านการให้ความร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เรียกว่า Maillard Reaction [71] โดย Sarifudin and Assiry [71] รายงานว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของเดกซ์ทรินเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของเกลียวและอุณหภูมิในกระบวนการ extrusion นอกจากนี้ Katz [68] ยังรายงานว่า การให้ความร้อนแป้งสาลีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 °C ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนมากกว่า 210 °C ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Caramelization) รวมถึงงานวิจัยของ Evans and Wurzburg [75] ที่รายงานว่า การอุณหภูมิในการให้ความร้อนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแป้ง สอดคล้องกับ การรายงานของ Greenwood [76] ที่สรุปว่าเดกซ์ทรินมีสีเหลืองเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 ถึง 220 °C เป็นเวลา 6 ถึง 18 ชั่วโมงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

สำหรับวิธีการดัดแปรแป้งสำหรับการเดกซ์ทรินและวิธีการทดสอบสมบัติของเดกซ์ทรินนั้น ในบทนี้ได้กล่าวถึงแผนการทดลอง วิธีการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลัง และวิธีการทดสอบสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ ศึกษาโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ความหนืด ค่าการละลาย และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ รวมถึงศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่สภาวะต่างๆ โดยวิธีการทดสอบสมบัติต่างๆ นี้ได้นำความรู้ที่ได้จากบทก่อนหน้ามาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาสมบัติต่างๆ ของแป้งมันสำปะหลังทั้งก่อน และภายหลังจากการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด นอกจากนี้ยังมีการอ้างอิงและดัดแปลงการศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังจากงานวิจัยอื่นๆ เพื่อให้การทดลองมีความสมบูรณ์มากที่สุด ซึ่งขั้นตอน และวิธีการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วิธีการดำเนินงาน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย จึงได้แบ่งวิธีดำเนินการทดลองเป็น 3 ส่วนได้แก่ การวางแผนการทดลอง การเตรียมอุปกรณ์ในการให้ความร้อน และการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง

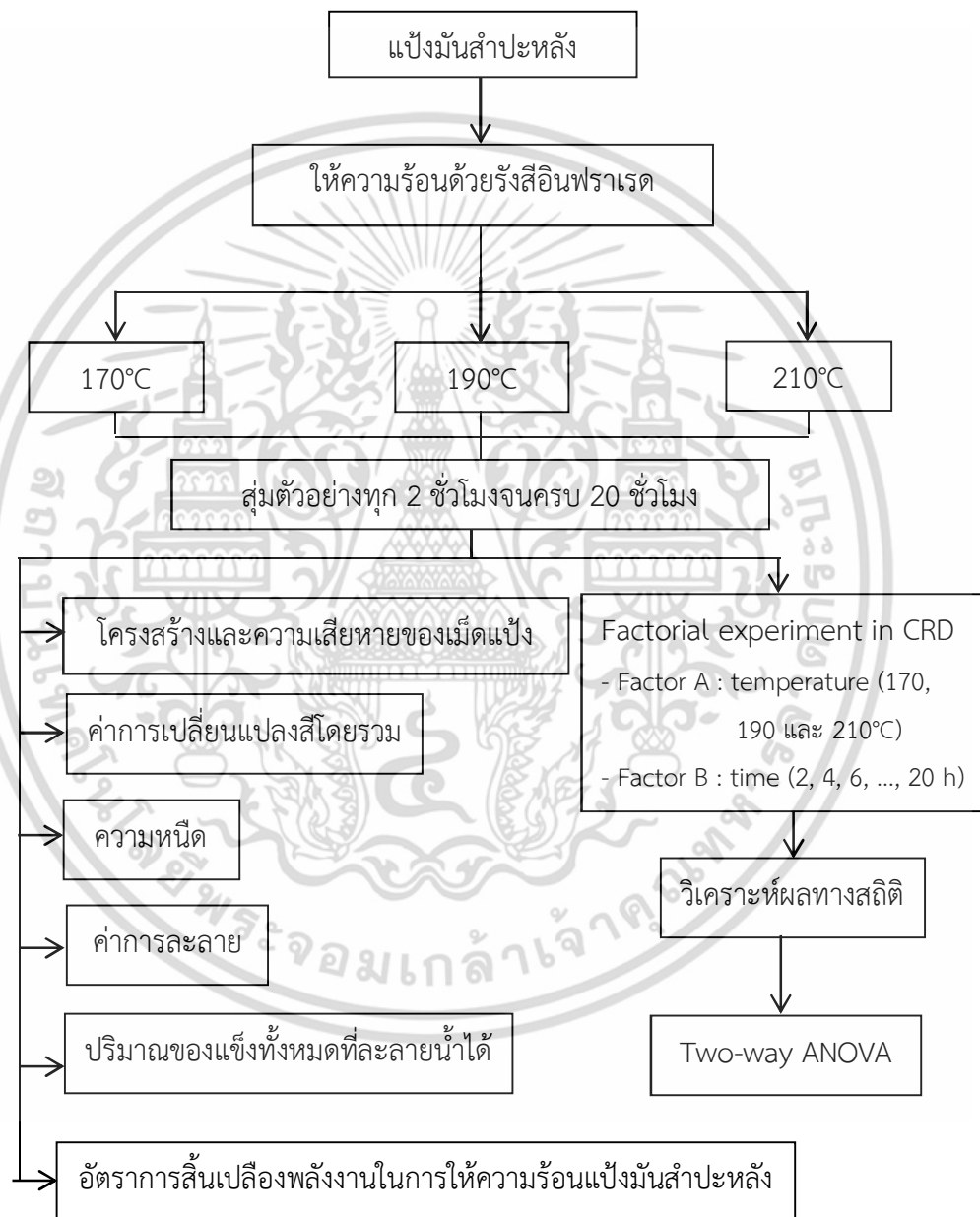
3.1.1 การวางแผนการทดลอง

แผนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของงานวิจัยโดยทำการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังด้วยรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ ที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C และสุ่มตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมงเพื่อนำไปศึกษาสมบัติของแป้ง ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้ง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ความหนืด ค่าการละลาย และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ การทดลองนี้ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Factorial Designs (Factorial in CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน Two-Way ANOVA และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) โดยมี 2 แฟคเตอร์คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อน 3 ระดับ และเวลาในการให้ความร้อน 10 ระดับ

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อน

อุปกรณ์ในการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังสำหรับในการทดลองครั้งนี้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเฉพาะเพื่อใช้ในการทดลอง มีลักษณะเป็นถังสเตนเลสทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 เมตร ความยาว 0.6 เมตร วางในแนวขนานกับพื้น หมุนโดยใช้มอเตอร์ขนาด 24 วัตต์ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ ให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังด้วยหลอดรังสีอินฟราเรดกำลังไฟ 850 วัตต์ จำนวน 2 หลอด สามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนได้โดยตัวต้านทาน (Potentiometer) และปรับกำลังไฟในการแผ่รังสีอินฟราเรดด้วยกล่องควบคุมกระแสไฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยทำการให้ความร้อนแป้งที่มีชั้นหนา 8 เซนติเมตร ทำการพลิกกลับ 1 รอบทุกๆ 6 นาที สำหรับอุณหภูมิ 170 °C, 5 นาทีสำหรับอุณหภูมิ 190 °C และ 4 นาที สำหรับอุณหภูมิ 210 °C



รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการทดลองทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลัง

3.1.3 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังในการทดลองครั้งนี้ได้มาจาก โรงงานแป้งมันไทยทำ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย แสดงในรูปที่ 3.3 แป้งมันสำปะหลังความชื้นเริ่มต้น 12.17 %db



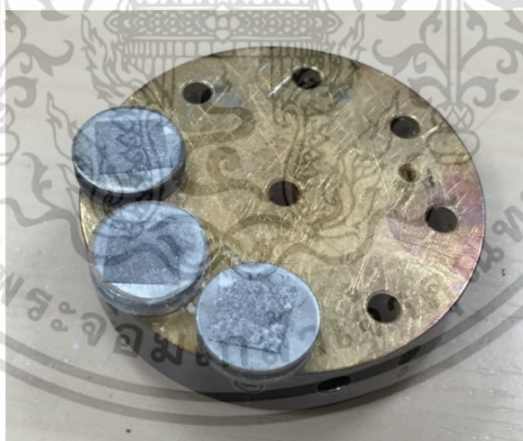
รูปที่ 3.3 แป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การตรวจสอบโครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้ง

การตรวจสอบโครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้งเป็นการศึกษารูปร่างและลักษณะของเม็ดแป้งโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

การตรวจสอบโครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้งศึกษาโดยใช้ Scanning Electron Microscopy โดยการส่องตัวอย่างจากนั้นนำไปฉาบเคลือบทองเพื่อให้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าด้วยเครื่อง Polaron Emitech (Quorum Technologies Ltd., SC7640, Laughton, UK) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 จากนั้นนำตัวอย่างแป้งไปตรวจสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (Carl Zeiss Co., EVO MA10, Oberkochen, Germany) (รูปที่ 3.6) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ค่าความต่างศักย์เร่ง (accelerating voltage) 20 กิโลโวลต์ จากนั้นนำภาพที่ได้จากการตรวจสอบมาวิเคราะห์ขนาดและความเสียหายของเม็ดแป้งภายหลังจากการให้ความร้อนแป้งด้วยรังสีอินฟราเรด



รูปที่ 3.4 การส่องตัวอย่างแป้งเพื่อนำไปฉาบเคลือบทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 Polaron Emitech (Quorum Technologies Ltd., SC7640)

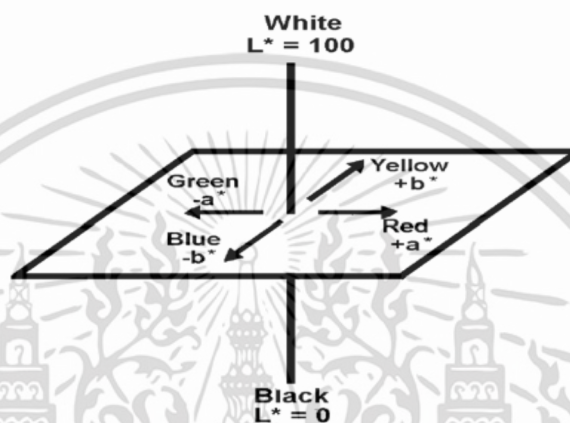


รูปที่ 3.6 Scanning Electron Microscopy (Carl Zeiss Co., EVO MA10)

3.3 การวัดค่าสีของแป้งมันสำปะหลัง

วัดค่าสีของแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Hunter Lab, MiniScan XE PLUS, Virginia, USA) แสดงดังรูปที่ 2.21 โดยการนำแป้งใส่ลงในถ้วยสำหรับวัดสี จากนั้นนำเครื่องวัดสีทดสอบสีของแป้งมันสำปะหลังทุกๆ 2 ชั่วโมงสำหรับอุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C โดยทำการวัดค่าสีตัวอย่างละ 3 ซ้ำ โดยกระจายตัวอย่างทุกตำแหน่งแบบสุ่ม เพื่อวัดค่าความสว่าง/มืด (L^*) ค่าสีแดง/เขียว (a^*) และค่าสีเหลือง/น้ำเงิน (b^*) ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ทั้ง 3 ระดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า L^* วัดความมืดและความสว่างของสีมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยค่า 0 หมายถึงความเป็นสีดำ(มืด) ค่า 100 หมายถึงความเป็นสีขาว (สว่าง) ค่า a^* วัดความเป็นสีแดง เมื่อมีค่าเป็นบวก วัดความเป็นสีเขียวเมื่อมีค่าเป็นลบและความเป็นสีเทาเมื่อมีค่าเป็นศูนย์ ค่า b^* วัดความเป็นสีเหลืองเมื่อมีค่าเป็นบวก วัดความเป็นสีน้ำเงินเมื่อมีค่าเป็นลบและความเป็นสีเทาเมื่อมีค่าเป็นศูนย์ แสดงในรูปที่ 3.7 นำค่า L^* , a^* และ b^* มาคำนวณหาค่าการเปลี่ยนสีโดยรวม (Total Color Different, ΔE) ดังแสดงในสมการที่ 2.2



รูปที่ 3.7 ค่า L^* , a^* และ b^* (Hunter, Richard Sewall) [61]

3.4 การศึกษาความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง

การใช้เครื่องมือวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ การทำงานของเครื่องเกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลววัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่ แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัวโดยแสดงด้วยเข็มสีแดงบนหน้าปัดเครื่องหรือหน้าจอดิจิทัล ค่านี้อ่านด้วยค่าคงที่ตามความเร็ว ขนาดและชนิดของเครื่องนี้มีหน่วยความหนืดของของเหลวเป็นเซนติพอยส์ (centipoise) [51]



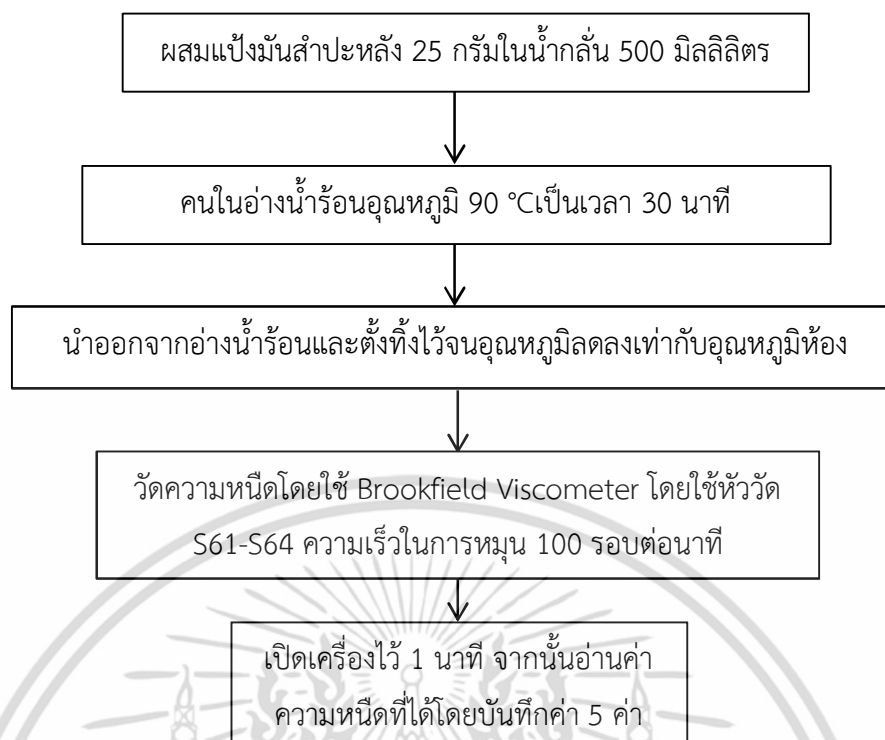
รูปที่ 3.8 Rotational Viscometer (Brookfield, DV-E)

การวัดความหนืดของแป้งมันสำปะหลังทำโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Rotational Viscometer (Brookfield, DV-E, Middleboro, USA) แสดงในรูปที่ 3.8 ดัดแปลงวิธีการของ Bello-Perez L.A. et. Al [77] โดยการละลายแป้ง 25 กรัมในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อน (Memmert, W600, Apeldoorn, Netherland) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาทีคนอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้แป้งเกิดการเจลาตินไนเซชัน จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 25 °C วัดความหนืดโดยใช้ หัววัดหมายเลข S61-S64 ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที โดยขั้นตอนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 อ่างน้ำร้อน (Memmert, W600)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการหาความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง

3.5 การศึกษาค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลัง

ค่าการละลายหาได้โดยอ้างอิงวิธีการของ M. Dubois [78] โดยการเตรียมสารละลายแป้ง 1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) นำไปแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปล่อยให้สารละลายเย็นตัวลงและนำสารละลายเทลงในหลอดเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่อง Microcentrifuge (Labnet, Spectrafuge 7M, Mayfield, USA) แสดงในรูปที่ 3.12 ที่ระดับ 5000×g เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นดูดของเหลวตอนบนใส่ภาชนะที่ทราบน้ำหนักแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักได้เป็นส่วนของแป้งที่ละลายน้ำได้ จากนั้นนำน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณค่าการละลายดังที่แสดงในสมการที่ 3.1 โดยขั้นตอนการทดลองหาค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังแสดงในรูปที่ 3.12

$$\text{ค่าการละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งที่ละลายน้ำ}}{\text{น้ำหนักแป้งทั้งหมด}} \times 100 \quad (\text{Eq 3.1})$$



รูปที่ 3.11 Microcentrifuge (Labnet, Spectrafuge 7M)



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการหาค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของแป้งมันสำปะหลัง

Refractometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการหักเหของแสง ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางกายภาพของสารนั้น ที่สัมพันธ์กับดรรชนีหักเหของแสง โดยมีหลักการคือ เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลางหนึ่ง เช่น จากอากาศสู่น้ำ จากน้ำสู่คริสตัล โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของตัวแปรที่มีผล เช่น มุม ความเร็ว หรือดัชนีหักเหของแสงของตัวกลางเป็นต้น

ค่าบริกซ์ (%Brix) จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในสารละลายน้ำ ปริมาณของแข็งที่สามารถละลายได้ทั้งหมดคือผลรวมของของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด เช่น น้ำตาล เกลือ โปรตีน กรด เป็นต้น และค่าที่อ่านได้จะออกมาในรูปผลรวมของปริมาณของแข็งทั้งหมด [58]



รูปที่ 3.13 Pocket Refractometer (Atago, Model PAL-1)

การศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทดสอบโดยอ้างอิงวิธีการของ Sarifudin A. [71] โดยใช้สารละลายแป้ง 10 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) จากนั้นทดสอบโดยใช้ Pocket Refractometer (Atago, Model PAL-1, Tokyo, Japan) แสดงในรูปที่ 3.13 จะได้ค่าที่ออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์บริกซ์ (%Brix)

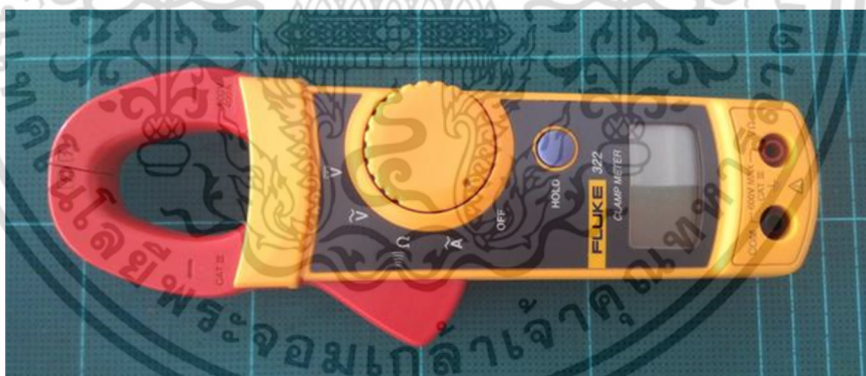
3.7 การศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการให้ความร้อนเป้งมันสำปะหลังโดยใช้หลอดรังสีอินฟราเรด

ค่าการใช้พลังงานในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเป้งมันสำปะหลังด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นค่าที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และยังสามารถแสดงถึงต้นทุนการอบแห้งวัสดุชีวภาพในอุตสาหกรรมอาหารอย่างหายาๆ ค่าพลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้จากปริมาณพลังงานที่วัดได้ในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด วัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Fluke, Clamp Meter 322, Mumbai, India) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 วัดค่ากำลังไฟฟ้าของหลอดอินฟราเรดระหว่างการให้ความร้อนเป้งมันสำปะหลัง 3 ระดับ 170 190 และ 210 °C จากนั้นนำไปคำนวณหาลำดับไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ 3.2 และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจากการใช้หลอดรังสีอินฟราเรดกับเวลา

$$P = IV \cos \varphi$$

(Eq 3.2)

เมื่อ	P	คือ	กำลังไฟฟ้า (W)
	I	คือ	กระแสไฟฟ้า (A)
	V	คือ	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)
	cos φ	คือ	power factor (มีค่า 0 ถึง 1)



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Fluke, Clamp Meter 322)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและวิจารณ์

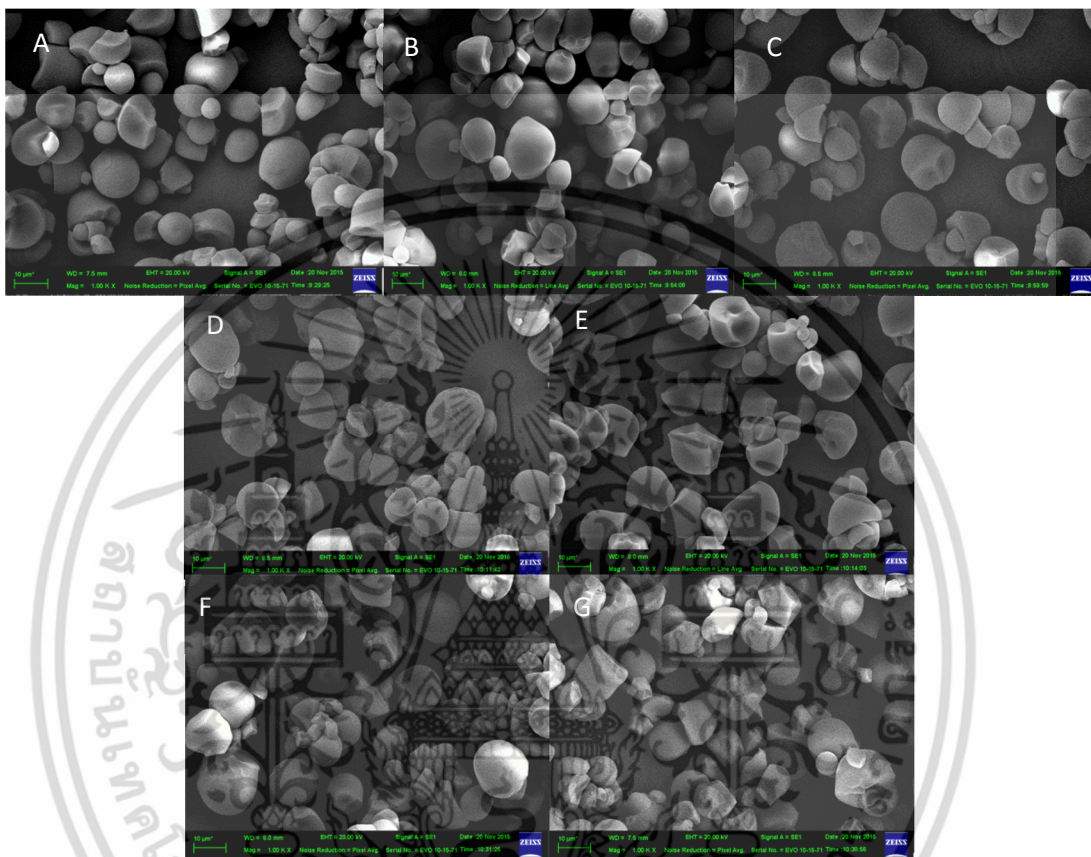
การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่ได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิแตกต่างกันได้แก่ 170 190 และ 210 °C ทำการให้ความร้อนเป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยสุ่มตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมงเพื่อนำมาทดสอบสมบัติได้แก่ ศึกษาโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ความหนืด ค่าการละลาย และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่สภาวะต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อทำการสรุปผลการทดลอง และหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการให้ความร้อนแป้งของกำลังไฟฟ้าแต่ละระดับ โดยผลการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 โครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้ง

ภาพขยายแสดงรูปร่างและความเสียหายของเม็ดแป้งธรรมชาติและแป้งที่ได้รับความร้อน (รูปที่ 4.1) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งธรรมชาติมีค่า 11.39 ± 3.22 ไมโครเมตรสอดคล้องกับรายงานของ Defloor et al. [79] ที่รายงานว่าขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีค่า 9.5 ถึง 13.6 ไมโครเมตรโดยมีรูปร่างเป็นทรงรีและทรงกลมขนาดเล็ก จากการตรวจสอบด้วย Scanning Electron Microscopy (Carl Zeiss Co., EVO MA10, Oberkochen, Germany) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ค่าความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) 20 กิโลโวลต์ พบว่าเม็ดแป้งมีพื้นผิวเรียบและมีรอยแยกเล็กน้อย เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนพื้นผิวของแป้งมีพื้นผิวหยาบขึ้นและเกิดรอยแยกจากความร้อน โดยที่รอยแตกและการแยกกันของเม็ดแป้งมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิ โดยค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลแป้งลดลงเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

ขนาดที่เล็กลงของเม็ดแป้งส่งผลต่อค่าความหนืดของแป้ง เนื่องจากความหนืดของแป้งเกิดจากการที่แป้งได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลถูกทำลาย การพองตัวนั้นทำให้น้ำบริเวณรอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งจึงเคลื่อนที่ได้ยากทำให้เกิดความหนืดขึ้น เมื่อแป้งมีขนาดโมเลกุลที่เล็กลงส่งผลให้การพองตัวของแป้งลดลงทำให้ความหนืดของแป้งลดลง [36] นอกจากนี้ขนาดที่ลดลงและรอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งยังส่งผลต่อค่าการละลายของแป้งเนื่องจากขนาดของเม็ดแป้งที่ลดลง ส่วนรอยแตกที่เกิดขึ้นส่งผลให้เม็ดสตาร์ซมีพื้นที่ผิวมากขึ้นส่งผลทำให้เพิ่มพื้นที่บริเวณที่สัมผัสกับน้ำมากขึ้นจึงมีแนวโน้มทำให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Katz [68] ที่รายงานว่าการให้ความร้อนแป้งสาธิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 °C ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิใน

การให้ความร้อนมากกว่า 210 °C โครงสร้างของแป้งเกิดความเสียหายและเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Caramelization) นอกจากนี้ยังรายงานว่าความสามารถในการละลายได้ในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น เมื่อให้ความร้อนแป้งที่อุณหภูมิมากกว่า 180 °C และค่าการละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อแป้งผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 140 °C



รูปที่ 4.1 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของแป้งมันสำปะหลังแบบต่างๆ (A) แป้งธรรมชาติ, (B) แป้งที่ได้รับความร้อน 170 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง, (C) แป้งที่ได้รับความร้อน 170 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง, (D) แป้งที่ได้รับความร้อน 190 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง, (E) แป้งที่ได้รับความร้อน 190 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง, (F) แป้งที่ได้รับความร้อน 210 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง, (G) แป้งที่ได้รับความร้อน 210 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

	เวลา (ชั่วโมง)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)
แป้งธรรมชาติ	-	11.39 \pm 3.22 ^a
170 °C	10	9.56 \pm 3.40 ^{ab}
	20	9.42 \pm 4.40 ^{ab}
190 °C	10	8.77 \pm 3.77 ^b
	20	8.41 \pm 4.03 ^b
210 °C	10	8.37 \pm 3.65 ^b
	20	7.64 \pm 4.22 ^b

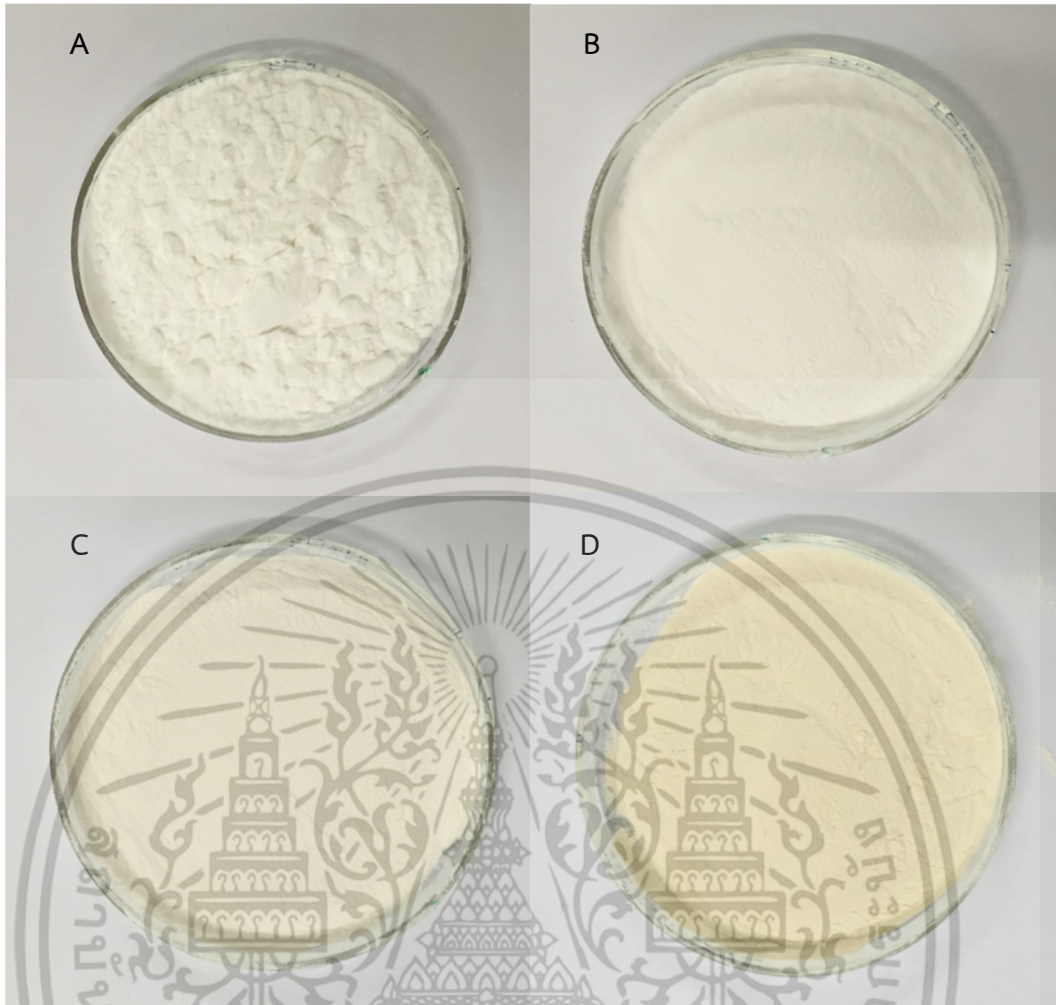
อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($\alpha=0.05$) ในคอลัมน์

4.2 ค่าสีของแป้งมันสำปะหลัง

การศึกษาค่าสีของแป้งมันสำปะหลังที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดทดสอบโดยเครื่องวัดค่าสี Spectrophotometer (Hunter Lab, MiniScan XE PLUS, Virginia, USA) โดยทำการสุ่มตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

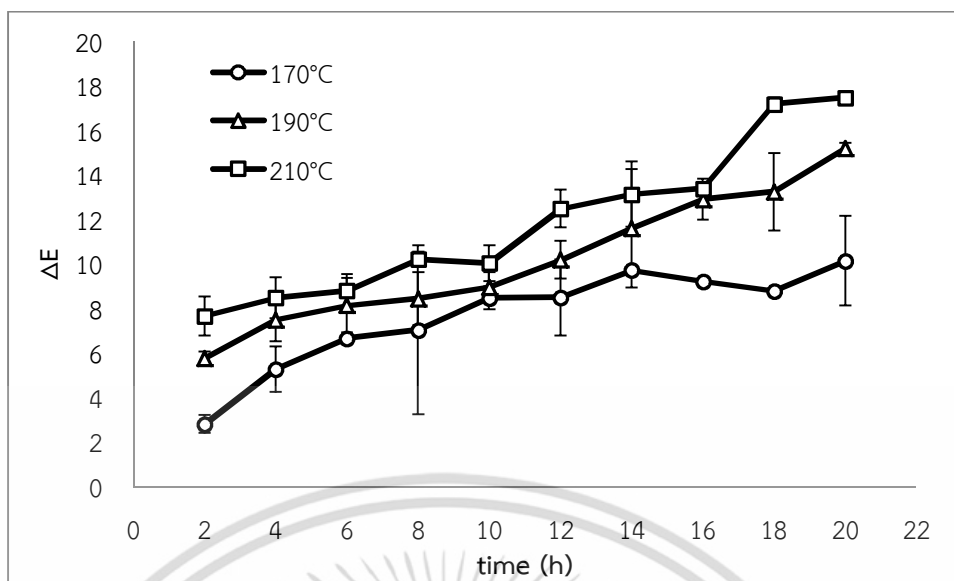
แป้งธรรมชาติมีค่าสีเริ่มต้นเท่ากับ 95.16, -0.28 และ 2.05 สำหรับค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่แป้งพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมเพิ่มขึ้นเนื่องจากการให้ความร้อนแป้งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เรียกว่า Maillard Reaction [71] โดยการให้ความร้อนที่ 210 °C ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) สูงสุดรองลงมาได้แก่ 190 และ 170 °C ตามลำดับ รูปที่ 4.2 แสดงสีของแป้งที่เปลี่ยนแปลงสำหรับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลา 20 ชั่วโมงซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าสีของแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนมีความแตกต่างจากแป้งธรรมชาติมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนในเวลาเท่ากัน ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมแสดงในตารางที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับเวลาในการให้ความร้อนแป้งแสดงในรูปที่ 4.3

ผลการทดสอบค่าสีของแป้งที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Evans and Wurzburg [75] ที่รายงานว่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแป้ง และรายงานของ Greenwood [76] ที่สรุปว่าเด็กซ์ทรินมีสีเหลืองเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 ถึง 220 °C เป็นเวลา 6 ถึง 18 ชั่วโมงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.2 แป้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง (A) แป้งธรรมชาติ (B) แป้งที่ได้รับความร้อน 170 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง (C) แป้งที่ได้รับความร้อน 190 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง (D) แป้งที่ได้รับความร้อน 210 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ความแตกต่างของค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของแป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ΔE		
	170°C	190°C	210°C
2	2.78±0.41 ^{c,c}	5.74±0.30 ^{b,f}	7.63±0.88 ^{a,e}
4	5.26±1.02 ^{b,bc}	7.46±0.96 ^{a,ef}	8.46±0.92 ^{a,de}
6	6.63±0.19 ^{b,bc}	8.12±1.22 ^{a,ef}	8.77±0.73 ^{a,cde}
8	7.01±3.80 ^{a,abc}	8.41±1.18 ^{a,ef}	10.00±0.33 ^{a,cd}
10	8.44±0.52 ^{a,ab}	8.94±0.66 ^{a,de}	10.19±0.81 ^{a,c}
12	8.89±1.71 ^{b,ab}	10.15±0.85 ^{b,cde}	12.45±0.84 ^{a,b}
14	9.70±0 ^{a,ab}	11.58±2.66 ^{a,bcd}	13.11±1.46 ^{a,b}
16	9.20±0 ^{b,ab}	12.88±0.93 ^{a,abc}	13.37±0.17 ^{a,b}
18	8.75±0.01 ^{c,ab}	13.22±1.74 ^{b,bc}	17.16±0.28 ^{a,a}
20	10.11±2.01 ^{b,a}	15.17±0.25 ^{b,a}	17.44±0.01 ^{a,a}

อักษรก่อนและหลังที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($\alpha=0.05$) ในแถวและคอลัมน์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง

ความหนืดเป็นสมบัติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้ง เมื่อแป้งได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลถูกทำลาย โดยที่การพองตัวนั้นจะทำให้หน้าบริเวณรอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งจึงเคลื่อนที่ได้ยากทำให้เกิดความหนืดขึ้น [36] การศึกษาความหนืดของสารละลายแป้งมันสำปะหลังทดสอบโดยการละลายแป้ง 25 กรัมในน้ำกลั่น 500 มิลลิตร จากนั้นนำไปแช่ในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.4 คนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้แป้งเกิดการเจลาติไนเซชัน จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนเหลือ 25 °C ทำการวัดค่าความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Rotational Viscometer (Brookfield, DV-E, Middleboro, USA) ใช้หัววัดขนาด S61 ถึง S64 ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที

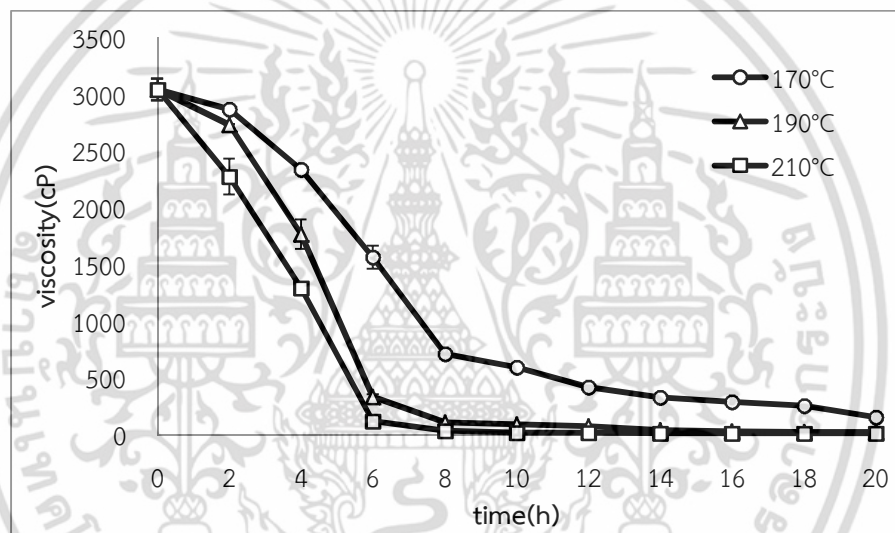
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนแป้งส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลงที่ทุกอุณหภูมิการให้ความร้อน โดยการลดลงของความหนืดของแป้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าสูงกว่ามีค่าที่เร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นค่าความหนืดเริ่มมีค่าคงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อให้ความร้อนกับแป้งที่ระดับอุณหภูมิ 190 และ 210 °C หลังจากผ่าน 6 ชั่วโมง เป็นต้นไป สำหรับที่อุณหภูมิต่ำ 170 °C ค่าความหนืดมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามเวลาการให้ความร้อนเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 190 และ 210 °C แต่เมื่อผ่าน 8 ชั่วโมงไปแล้วนั้นอัตราการการลดลงของความหนืดมีค่าลดลงตามเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาความหนืดของสารละลายแป้งได้ทำการวัดค่าความหนืดของแป้งที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยที่ความหนืดเริ่มต้นของแป้งมีค่าเท่ากับ $3,079.6 \pm 93.5$ เซนติพอยส์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.3

ความหนืดที่ลดลงเกิดจากโมเลกุลของแป้งมีขนาดเล็กลงเมื่อแป้งได้รับความร้อนโดยอ้างอิงจากผลการทดลองที่ 4.1 ทำให้เม็ดแป้งพองตัวจะดูดซับน้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งได้น้อยส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลง [36] สอดคล้องกับรายงานของโอนซา และคณะ [69] ที่ได้ทำการดัดแปรแป้งข้าวเหนียวด้วยรังสีไมโครเวฟเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งดีขึ้น โดยแป้งข้าวเหนียวดัดแปรสตาร์ชด้วยไมโครเวฟมีคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิด เจลาติไนเซชัน และค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น แต่ค่าพารามิเตอร์ด้านความหนืดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวปกติ



รูปที่ 4.4 การให้ความร้อนสารละลายแป้งในอ่างน้ำร้อน



รูปที่ 4.5 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความแตกต่างของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ความหนืด (cP)		
	170°C	190°C	210°C
0	3079.6±93.5 ^{ns,a}	3079.6±93.5 ^{ns,a}	3079.6±93.5 ^{ns,a}
2	2864.0±27.8 ^{a,b}	2731.2±2.4 ^{b,b}	2274.6±156 ^{c,b}
4	2335.3±37.4 ^{a,c}	1765.2±130.9 ^{b,c}	1293.0±46.6 ^{c,c}
6	1560.6±100.3 ^{a,d}	3311.0±24.6 ^{b,d}	113.7±3.2 ^{c,d}
8	711.8±6.6 ^{a,e}	102.6±5.0 ^{b,e}	31.3±0.2 ^{c,e}
10	590.9±17.0 ^{a,f}	87.8±0.8 ^{b,e}	15.3±0.1 ^{c,e}
12	417.4±6.6 ^{a,g}	70.2±0.7 ^{b,ef}	11.7±0.1 ^{c,e}
14	325.7±24.1 ^{a,g}	36.8±1.1 ^{b,f}	10.2±0.1 ^{c,e}
16	287.3±27.1 ^{a,gh}	28.1±0.1 ^{b,f}	8.9±0.1 ^{c,e}
18	249.0±3.4 ^{a,h}	21.0±1.2 ^{b,f}	7.5±0.1 ^{c,e}
20	147.9±0.7 ^{a,i}	20.5±0.1 ^{b,f}	7.1±0.1 ^{b,e}

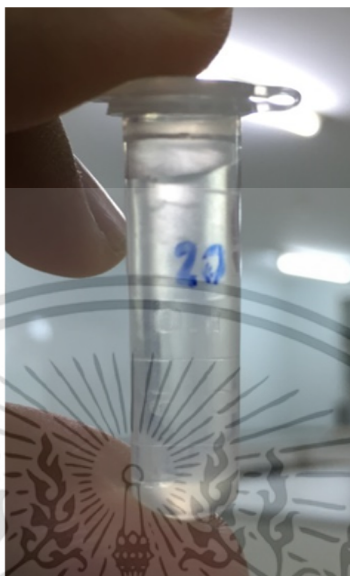
อักษรก่อนและหลังที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($\alpha=0.05$) ในแถวและคอลัมน์ตามลำดับ

4.4 ค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งธรรมชาติจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชัน เนื่องจากโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) จำนวนมากและจับกับด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างแน่นหนา ซึ่งพันธะไฮโดรเจนเกิดจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้กันเกิดการเชื่อมกัน [29] แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายแป้งให้สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชัน พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวขึ้นและบางส่วนของแป้งจะละลาย ทำให้ความหนืด ความใสและค่าการละลายเพิ่มขึ้น โดยกำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรและน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ [30]

การทดสอบค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังทดสอบโดยการละลายแป้ง 1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในหลอดเหวี่ยงและนำไปแช่ในอ่างน้ำร้อน 90 °C เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้เกิดการเจลาติโนเซชัน จากนั้นทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้องและนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่อง Microcentrifuge (Labnet, Spectrafuge 7M, Mayfield, USA) ที่ระดับ 5000×g เป็นเวลา 30 วินาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

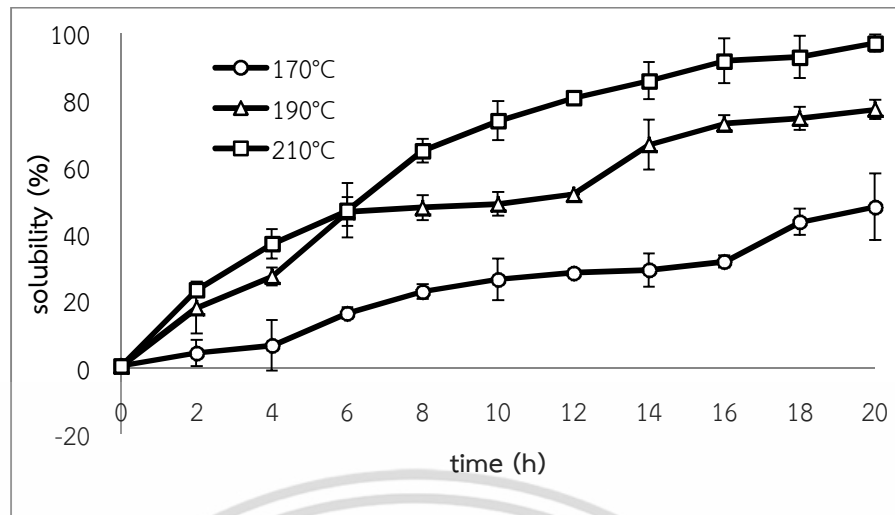
นาที่ เพื่อแยกชั้นส่วนที่ละลายน้ำเป็นเวลา 30 นาทีดังรูปที่ 4.6 นำส่วนที่เป็นของเหลวไปอบเพื่อหา น้ำหนักของแข็งที่ละลายน้ำได้และนำไปคำนวณค่าการละลายของแข็ง



รูปที่ 4.6 ของเหลวที่แยกชั้นออกจากตะกอนหลังจากการเหวี่ยง

ผลการศึกษาค่าการละลายของสารละลายแข็งแสดงในรูปที่ 4.7 การทดสอบค่าการละลายของแข็งที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยที่ค่าการละลายเริ่มต้นของแข็งมีค่าเท่ากับ 0.56 ± 0.63 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาค่าการละลายของแข็งที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมงพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่แข็ง ส่งผลให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนส่งผลให้พันธะของแข็งถูกทำลาย ส่งผลให้ความยาวของพันธะสั้นลงทำให้แข็งละลายน้ำได้ดีขึ้น [28] เมื่อทำการให้ความร้อนแข็งเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ค่าการละลายของแข็งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C มีค่าเท่ากับ 48.08 ± 9.98 77.26 ± 2.92 และ 97.13 ± 2.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยผลการทดสอบค่าการละลายและความแตกต่างทางสถิติได้แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งผลการทดสอบค่าการละลายของแข็งมันสำปะหลังที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Noranizan et.al [73] ที่ได้ทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแข็งสาลี แป้งสาคุ แป้งมันสำปะหลัง และ แป้งมันฝรั่ง ที่อุณหภูมิ 100 110 และ 120 °C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ส่งผลให้กำลังการพองตัวและค่าการละลายเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ความแตกต่างของค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการละลาย (%)		
	170°C	190°C	210°C
0	0.56±0.63 ^{ns,e}	0.56±0.63 ^{ns,f}	0.56±0.63 ^{ns,g}
2	4.40±3.92 ^{b,e}	17.97±7.82 ^{a,e}	23.30±1.84 ^{a,f}
4	6.64±7.56 ^{b,de}	27.34±2.68 ^{a,d}	37.08±4.45 ^{a,e}
6	16.30±1.73 ^{b,cd}	46.68±4.27 ^{a,c}	47.01±8.13 ^{a,e}
8	22.80±2.16 ^{c,bc}	47.88±3.75 ^{b,c}	64.92±3.52 ^{a,d}
10	26.41±6.19 ^{c,bc}	48.98±3.52 ^{b,c}	73.90±5.86 ^{a,cd}
12	28.37±0.96 ^{c,b}	51.96±0.12 ^{b,c}	80.72±0.58 ^{a,bc}
14	29.22±5.01 ^{c,b}	66.77±7.49 ^{b,b}	85.84±5.49 ^{a,abc}
16	31.73±1.87 ^{c,b}	73.00±2.46 ^{b,ab}	91.81±12.75 ^{a,ab}
18	43.60±3.97 ^{c,a}	74.63±3.48 ^{b,ab}	92.96±7.32 ^{a,ab}
20	48.08±9.98 ^{c,a}	77.26±2.92 ^{b,a}	97.13±2.62 ^{a,a}

อักษรก่อนและหลังที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($\alpha=0.05$) ในแถวและคอลัมน์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งมันสำปะหลัง

ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในอาหาร (total soluble solid) หมายถึงปริมาณสารประกอบชนิดต่างๆ ที่ละลายได้อย่างสมบูรณ์ในตัวทำละลายที่มีอยู่ในอาหารซึ่งส่วนใหญ่คือน้ำ สารละลายที่ได้มักจะเป็นน้ำตาลและกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ รวมทั้งกรดอะมิโนและกรดแอสคอร์บิก หรือวิตามินซีด้วย การวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในอาหารนิยมวัดด้วยเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์แบบ Hand Refractometer ในขณะที่การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งที่ได้รับความร้อนเป็นการบ่งบอกถึงปริมาณของแป้งที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความร้อนและโมเลกุลเปลี่ยนเป็นน้ำตาล [57]

การทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทดสอบโดยการละลายแป้ง 10 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในน้ำเย็นแสดงในรูปที่ 4.8 จากนั้นนำไปวัด ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่อง Pocket Refractometer (Atago, Model PAL-1, Tokyo, Japan)

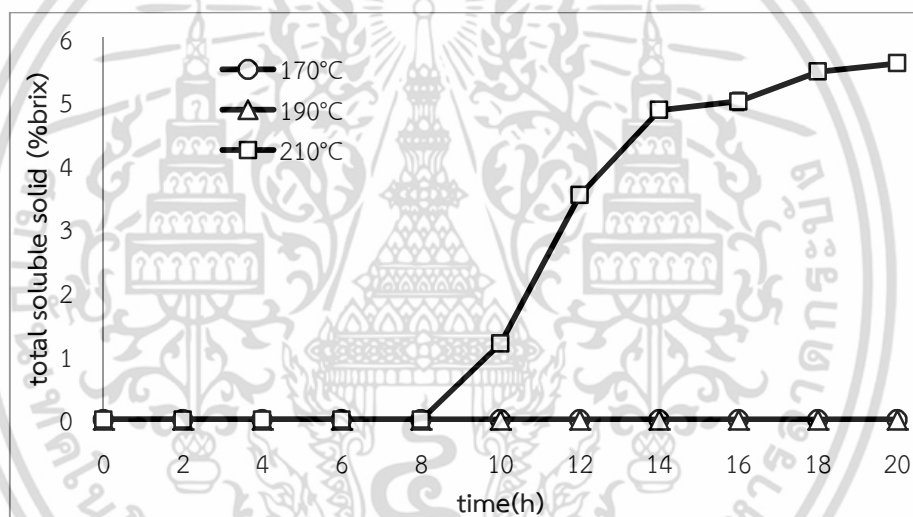


รูปที่ 4.8 สารละลายแป้งสำหรับการทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

รูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.5 เป็นผลการศึกษาหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยเมื่อแป้งที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์บริกซ์ ผลการศึกษาค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมงพบว่าทำให้ความร้อนที่ 210 °C เป็นเวลามากกว่า 8 ชั่วโมงจึงจะส่งผลให้แป้งเกิดของแข็งที่ละลายน้ำได้และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อน ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลา 8 ถึง 14 ชั่วโมง หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีการลดลง ที่เวลา 20 ชั่วโมง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.60±0.00 เปอร์เซ็นต์บริกซ์ เนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่สามารถไฮโดรไลซ์โมเลกุลของพันธะไฮโดรเจนของแป้งได้ [70] ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งจึงแสดงผลเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน

ผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แตกต่างจากผลการศึกษาค่าการละลายเนื่องจากการทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เป็นการทดสอบโดยใช้น้ำอุณหภูมิปกติในขณะที่การทดสอบค่าการละลายเป็นการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาตีในเซชันของแป้ง ดังนั้นผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จึงเป็นการบ่งบอกปริมาณของแข็งหรือองค์ประกอบของแป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Katz [68] ที่ได้ทำการให้ความร้อนแป้งสาลีที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่อให้ความร้อนแป้งสาลีที่อุณหภูมิสูงกว่า 180 °C ส่งผลให้ความสามารถในการละลายในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น ในขณะที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายในน้ำเย็น



รูปที่ 4.9 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาต่างๆ

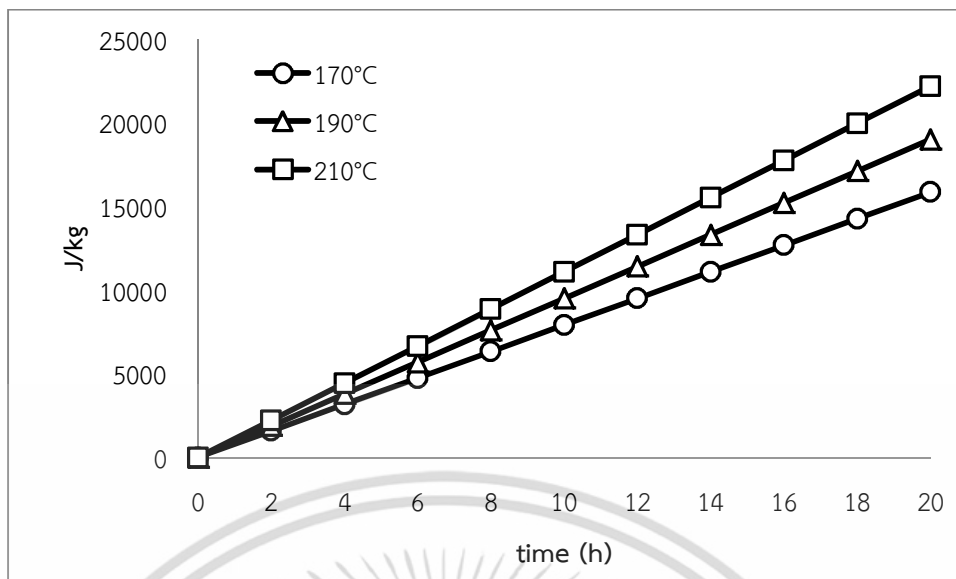
ตารางที่ 4.5 ความแตกต่างของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (%)		
	170°C	190°C	210°C
0	nd	nd	nd
2	nd	nd	nd
4	nd	nd	nd
6	nd	nd	nd
8	nd	nd	nd
10	nd	nd	1.20 ± 0.08 ^f
12	nd	nd	3.53 ± 0.05 ^e
14	nd	nd	4.87 ± 0.05 ^d
16	nd	nd	5.00 ± 0.14 ^c
18	nd	nd	5.47 ± 0.05 ^b
20	nd	nd	5.60 ± 0.00 ^a

อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($\alpha=0.05$) ในคอลัมน์ และ nd คือ non-detected

4.6 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของการให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังโดยใช้หลอดรังสีอินฟราเรด

การศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการให้ความร้อนแป้งด้วยหลอดรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดพลังงาน (ยี่ห้อ Fluke รุ่น Clamp Meter 322) จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้ามาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า ผลการศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างงานกับเวลาในรูปที่ 4.10 และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการให้ความร้อนที่เวลาต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.10 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของการให้ความร้อนแบ่งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.6 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการให้ความร้อนแบ่งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน (J/kg)		
	170°C	190°C	210°C
2	1584	1901	2218
4	3168	3802	4435
6	4752	5703	6653
8	6336	7603	8870
10	7920	9504	11088
12	9504	11405	13306
14	11088	13306	15523
16	12672	15206	17741
18	14256	17107	19958
20	15840	19008	22176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่แป้งมันสำปะหลังโดยใช้รังสีอินฟราเรดต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้ง ที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยผลการทดลองแบ่งออกเป็น 6 ส่วนได้แก่ ผลการศึกษาโครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้ง ผลการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของแป้ง ผลการศึกษาค่าความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง ผลการศึกษาค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลัง ผลการศึกษ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้ง และผลการศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนั้นในบทนี้ได้นำเสนอในส่วนสรุปผลการวิจัยใน 6 ส่วนที่กล่าวไปข้างต้น ทั้งนี้ ข้อเสนอแนะที่ควรเพิ่มเติมเพื่อให้งานทดลองสมบูรณ์มากขึ้นได้นำมาแนะนำเสนอในบทนี้เช่นกัน

5.1 สรุปผลการวิจัย

แป้งมันสำปะหลังมีค่าความชื้นเริ่มต้น 12.17 %db ถูกนำมาให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบสมบัติของแป้งได้แก่ โครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้ง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ความหนืด ค่าการละลาย ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

การศึกษาโครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าเม็ดแป้งธรรมชาติมีขนาดเส้นศูนย์กลางเฉลี่ย $11.39 \pm 3.22 \mu\text{m}$ เมื่อแป้งผ่านการให้ความร้อนแป้งที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยใช้รังสีอินฟราเรดพบว่าความร้อนมีอิทธิพลต่อรูปร่างและขนาดของเม็ดแป้ง โดยเมื่อทำการวัดขนาดของเม็ดแป้งพบว่าแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 210 °C มีขนาดเม็ดแป้งเล็กที่สุดโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งเท่ากับ $7.64 \pm 4.22 \mu\text{m}$ ในขณะที่ขนาดเม็ดแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 170 และ 190 °C มีค่า 9.42 ± 4.40 และ $8.41 \pm 4.03 \mu\text{m}$ ตามลำดับ

การศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมโดยใช้ Spectrophotometer พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนสีโดยรวมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งธรรมชาติ

ผลการศึกษาความหนืดของแป้งโดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์วัดความหนืดของสารละลายแป้ง 5 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่าแป้งธรรมชาติมีความหนืด $3,079.6 \pm 93.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนติพอยส์ เมื่อทำการให้ความร้อนแบ่งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ค่าความหนืดของแบ่งมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแบ่ง โดยที่เวลา 20 ชั่วโมงแบ่งมีความหนืดเท่ากับ 147.9 ± 0.7 20.5 ± 0.1 และ 7.1 ± 0.1 เซนติพอยส์ สำหรับอุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C ตามลำดับ

ค่าการละลายของแบ่งธรรมชาติมีค่าการละลาย 0.56 ± 0.63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการให้ความร้อนแบ่งโดยใช้รังสีอินฟราเรดพบว่า ค่าการละลายของแบ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนแบ่ง เมื่อให้ความร้อนแบ่งเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ค่าการละลายของแบ่งมีค่าเท่ากับ 48.08 ± 9.98 77.26 ± 2.92 และ 97.13 ± 2.62 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C ตามลำดับ

จากการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของแบ่งมันสำปะหลังโดยใช้ Refractometer พบว่าแบ่งธรรมชาติมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 0 %Brix เช่นเดียวกับการให้ความร้อนแบ่งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 170 และ 190 °C ซึ่งปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สามารถวัดค่าได้เมื่อทำการให้ความร้อนแบ่งที่อุณหภูมิ 210 °C มากกว่า 10 ชั่วโมงขึ้นไป โดยที่เวลา 10 ชั่วโมงของการให้ความร้อนแบ่งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 210 °C ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่า 1.20 ± 0.08 %Brix และที่เวลา 20 ชั่วโมงมีค่า 5.47 ± 0.05 % Brix

เมื่อวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานในการให้ความร้อนแบ่งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 15,840 19,008 และ 22,176 J/kg ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมบัติอื่นๆ ของแบ่งนอกเหนือจากการทดลองนี้ เช่น การศึกษาค่าสีน้ำเงิน (blue value) ของแบ่งที่ผ่านการให้ความร้อน เพื่อหาปริมาณของแบ่งที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความร้อนจากรังสีอินฟราเรด และสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของพันธะภายในเม็ดสตาร์ชภายหลังจากการได้รับความร้อน หรือการศึกษาพฤติกรรมของแบ่งระหว่างการให้ความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter เพื่อให้สามารถอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแบ่งมันสำปะหลัง

2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเดกซ์ทรินที่ได้จากการทดลองในการใช้งานจริง เช่น การศึกษาประสิทธิภาพ ได้แก่ ความแข็งแรงในการยึดติดของกาวจากเดกซ์ทรินที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับกาวเดกซ์ทรินตามท้องตลาด เพื่อเป็นการพัฒนากระบวนการผลิตเดกซ์ทรินโดยใช้รังสีอินฟราเรดในการให้ความร้อน

3. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังต่อสมบัติของแบ่งมันสำปะหลังเนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกที่แตกต่างกันมีผลต่อขนาดและสมบัติของแบ่งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] William, F.B., Piyachomkwan, K. and Sriroth, K. 2009. Tapioca/Cassava Starch: Production and Use. Starch: Chemistry and Technology. Third Edition.
- [2] สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย. 2558. สถิติส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. สืบค้นเมื่อ 4 เมษายน, 2558, จาก <http://www.thaitapiocastarch.org>.
- [3] นิธิยา รัตนานพนธ์. 2557. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.
- [4] Radley, J.A. 1976. Industrial Uses of Starch and its Derivatives. Springer Science & Business Media.
- [5] Hanamaka, D., Furuse, T., Han, W., and Tanaka, S. 2006. Effect of the wavelength of infrared heaters on inactivation of bacterial spores at various water activities. International Journal of Food Microbiology. 108(2). pp. 281-285.
- [6] Nowak, D. and Lewiciki, P.P. 2004. Infrared drying of apple slices. Innovative Food Science and Emerging Technologies 5. pp. 353-360.
- [7] Krishnamurthy, K., Khurana, H.K., Jun, S., Irudayaraj J. and Demicri, A. 2009. Food Processing Operations Modeling: Design and Analysis. In Jun, S. and Irudayaraj, J.M. (Eds.), Food Science and Technology Series, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. pp. 13-142.
- [8] นิรนาม. What is Tapioca flour ?. [Online]. Available : <http://www.wisegeek.com/what-is-tapioca-flour>. เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน 2558
- [9] Lori Alden. Starch Thickeners. [Online]. Available: <http://www.foodsubs.com/ThickenStarch.html>. เข้าถึงเมื่อ 5 เมษายน 2558
- [10] Thailand Tapioca Starch. 2558. แป้งมันสำปะหลัง. Available: <http://www.thailandtapiocastarch.net>. เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน 2558
- [11] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2548. Available: <http://www.oae.go.th>. เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน 2558
- [12] BeMiller J.N. and Whistler R.L. 1996. Carbohydrates. Food Chemistry. 3. Marcel Dekker, Inc., New York. pp. 157-223.
- [13] นิรนาม. Amylose. [Online]. Available : <http://glossary.periodni.com/dictionary.php?en=amylose>. เข้าถึงเมื่อ 5 เมษายน 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] นิรนาม. Amylopectin. [Online]. Available :
<http://glossary.periodni.com/dictionary.php?en=amylopectin>. เข้าถึงเมื่อ 5
 เมษายน 2558
- [15] Defloor, I., Dehing, I., & Delcour, J. A. 1998. Physico-chemical properties of cassava starch. *Starch/Starke*, 50. pp. 58–64.
- [16] Li, J.-Y., & Yeh, An-I. (2001). Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches. *Journal of Food Engineering*, 50(3). pp. 141–148.
- [17] Jenkins PJ, Donald AM. The influence of amylose on starch granule structure. *Int J Biol Macromol*. 1995. 17. pp. 315–321.
- [18] Hamaker, B.R. and Griffin, V.K. 1993. Effect of disulfide bond containing protein on rice starch gelatinization and pasting. *Cereal Chem* 70. pp. 377–380.
- [19] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- [20] M., Kasemsuan, T. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. *Cereal Chemistry*. 76.
- [21] Osman, Elizabeth M. 1967. Starch in food industry. In *Starch Chemistry and Technology*. Eds., Whistler, Roy L., and Paschall, E. F. Vol 2. Industrial Aspects. New York. Academic Press. pp. 163-215.
- [22] Rickard, J.E., Asaoka, M. & Blanshard, J.M.V. (1991). Review: the physico-chemical properties of cassava starch. *Tropical Science*, 31. pp. 189–201.
- [23] Clarissa Cagnato. Starch Grain Analysis. [Online]. Available :
<http://clarissacagnato.weebly.com/starch-grain-analysis.html> เข้าถึงเมื่อ 5
 เมษายน 2558
- [24] นิรนาม. Starch Granules. [Online]. Available : <http://www.intechopen.com>
 เข้าถึงเมื่อ 5 เมษายน 2558
- [25] นิรนาม. Modification of tapioca starch pastes. [Online]. Available :
http://www.mpip-mainz.mpg.de/4120246/Modified_starches เข้าถึงเมื่อ
 12 กรกฎาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [26] Sriroth, K., R. Chollakup, S. Chotineeranat, K. Piyachomkwan and C.G. Oates, 1999. Processing of cassava waste for improved biomass utilization. *Bioresource Technol.*, 71. pp. 63-69.
- [27] Leach, H. W., McCowen, L. D., & Schoch, T. J. 1959. Structure of the starch granule. I. Swelling and solubility patterns of various starches. *Cereal Chemistry*, 36. pp. 534
- [28] Tongdang, T 2001. Molecular Structure of Native and Processed Rice, PhD Thesis, Division of Food Sciences, University of Nottingham, Nottingham, UK.
- [29] Eliasson, A.-C., & Gudmundsson, M. 1996. Starch: Physicochemical and functional aspects. In A.-C. Eliasson (Ed.), *Carbohydrates in food*. New York: Marcel Dekker, Chapter 10. pp. 431–502.
- [30] Schoch, T.J. 1964. Swelling power and solubility of granular starches. In *Methods in Carbohydrate Chemistry*, Vol 4 (R.L. Whistler, ed.), Academic Press, New York, NY. pp. 106– 108
- [31] Tester, R. F., and Morrison, W. R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal Chem.* 67. pp. 551-557.
- [32] นิรินาม. Food, Starch. [Online]. Available : <http://www.hosokawamicron.co.jp/en/applications/1047> เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [33] Gunaratne, A., and Hoover, R. 2002. Effect of heat- moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. *Carbohydr. Polym.* 49. pp.425-437.
- [34] R-L. Whistler and J.N. BeMiller. 1999. Starch in *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*. (Eds R-L. Whistler and J.N. BeMiller), American Association of Cereal Chemists. Inc., Minnesota. pp. 128-130
- [35] Hermansson, A.-M., & Svegmak, K. 1996. Developments in the understanding of starch functionality. *Trends in Food Science and Technology*, 7. pp. 345–353.
- [36] Zobel, F. Z., & Stephen, A. M. 1995. Starch: structure, analysis and application. In A. M. Stephen (Ed.), *Food polysaccharides and their application*. New York: Taylor & Francis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [37] Atwell, W.A., Hood, L.F., Lineback, D.R., Varriano-Marston, E. and Zobel, H.F. 1988. The technology and methodology associated with basic starch phenomena. Cereal Foods World, Vol. 33. pp. 306-311.
- [38] Srichuwong, S., Sunarti, T.C., Mishima, T., Isono, N., and Hisamatsu, M. 2005. Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. Carbohydrate Polymers, 60. pp. 529-538.
- [39] Galliard T. 1987. Starch: Properties and Potential. Society of Chemical Industry. Great Britain, 13. pp. 1-114
- [40] Wikipedia. Dextrin. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Dextrin> เข้าถึงเมื่อ 12 สิงหาคม 2558
- [41] Angel Starch And Food Private Limited. Foundry industry. [Online]. Available : <http://www.angelfoodstarch.com/foundry-industries.html> เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [42] Edward M. 2004. Starch and Dextrin Based Adhesives. SpecialChem. Available: <http://www.pyrobin.com>. เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน 2558
- [43] นีรนาม. Yellow Dextrin. [Online]. Available : <https://amazon.co.uk> เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [44] Slavin J., Savarino V., Paredes-Diaz A. and Fotopoulos G. 2009. A review of the role of soluble fiber in 536 health with specific reference to wheat dextrin. Journal of International Medical Research. 37. pp. 1-17.
- [45] วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน และธราพงษ์ ศรีคงแก้ว. 2552. รายงานการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์ ผลของปีตาไซโคลเด็กซ์ตรินที่เชื่อมติดกับสีย้อมและมิโคนาโซลโนเตรทต่อสิ่งทอ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [46] Cleveland. Direct steam mixer kettle. [Online]. Available : http://www.clevelandrange.com/Product/fam_vhtgk/TMKDL-T-Direct-steam-mixer-kettle-tilting เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [47] Moscicki L. Extrusion Cooking Techniques. 2011. Lublin University of Life Sciences. Department of Food Process Engineering, Doswiadczalna, Lublin, Poland.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [48] นิรนาม. Bio Medical Engineering Solutions. [Online]. Available : <http://beslakmal6.blogspot.com/p/plastic-extruder.html>
เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [49] สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุทางชีวภาพ. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.
- [50] GEA. Rotary Dryers. [Online]. Available : http://www.gea.com/global/en/products/rotary_dryer.jsp
เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [51] จิรารัตน์ ทัดติยกุล. 2554. วิทยากระแสนของอาหาร. ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- [52] Cole-Parmer. Brookfield Low-range viscometer. [Online]. Available : http://www.coleparmer.com/Product/Brookfield_Low_range_viscometer_115_VAC/EW-98945-00. เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [53] Machinery Lubrication. Understanding Absolute and Kinematic Viscosity. [Online]. Available : <http://www.machinerylubrication.com/Read/294/absolute-kinematic-viscosity>
เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [54] Brautlecht, C.A. 1953. Starch, Its Sources, Production, and Uses. Reinhold. New York.
- [55] Brabender CWB. Micro Visco-Amylo-Graph. [Online]. Available : http://www.cwbrabender.com/Micro_Visco-Amylo-Graph.html เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [56] Milling ournal. Perten Instruments Launches RVA 4500 Rapid Visco Analyzer. [Online]. Available : http://www.millingjournal.com/articles/Perten_Instruments_Launches_RVA_4500_Rapid_Visco_Analyzer-100492.html เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [57] ICUMSA., 2009. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis-The Determination of Refractometric Dry Substance (RDS %) of Molasses – Accepted and Very Pure Syrups (Liquid Sugars), Thick Juice and Run-off Syrups-Methods Book GS4/3/8-13. Peterborough-UK.
- [58] Refractometer. NANOTEC Laboratory. สืบค้นจาก www.nanotec.or.th. เมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [59] VeeGee. VEE GEE BTX-1 Handheld Refractometer. [Online]. Available : <https://www.veege.com/products/refractometers/brix-refractometers/43002-vee-gee-btx-1-handheld-refractometer.html>. เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [60] Select Tech. Refractometer. [Online]. Available : <http://selectech.co.za/refractometers-are-fantastic-why-and-how-you-use-a-refractometer/> เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [61] Hunter, Richard Sewall (July 1948). "Photoelectric Color-Difference Meter". Proceedings of the Winter Meeting of the Optical Society of America. JOSA 38 (7): pp. 661.
- [62] แม้น อมรสิทธิ์ หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ พิมพ์ครั้งที่ 1 ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์ กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2534
- [63] T. Toya, R. Jotaki. 1986. Specimen Preparations in EPMA and SEM . JEOL Training Center EP Section.
- [64] นิรนาม. Scanning Electron Microscopy. [Online]. Available : <http://cmrf.research.uiowa.edu/scanning-electron-microscopy/> เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [65] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, กรุงเทพฯ: โครงการส่งเสริมการสร้างตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [66] สุคนธ์ชื่น ศรีงาม. 2549. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [67] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. pectrum. [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com>. เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559
- [68] Katz, J.R. Dextrin (british gum) formed by heating dry starch. 1934. Rec.Trav. Chim 53, Chem. Abt. A, 28:4265. 1934). pp.555-60
- [69] อโนชา สุขสมบูรณ์ พัลลภ ไพพงษ์ กรกช หล่อโลหการ กิตติญาณ เขียวเชิงคำ มนต์ราม อินทรศิริ และ อรอนงค์ นัยวิกุล. การใช้ประโยชน์จากข้าว. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [70] Harper, J., 1992. Extrusion processing of starch. In: Alexander, R.J., Zobel, H.F. (Eds.), Developments in Carbohydrate Chemistry. American Association of Cereal Chemists, USA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [71] Sarifudin A. and Assiry A. (2014). Some physicochemical properties of dextrin produced by extrusion process. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13. pp. 100-106.
- [72] Murua-Pagola, B., Beristain-Guevara, C.I., Martinez-Bustos, F., 2009. Preparation of starch derivatives using reactive extrusion and evaluation of modified starch as shell materials for encapsulation of flavoring agents by spray drying. *J. Food Eng.* 91. pp. 380–386.
- [73] Noranizan, M. A., *Dzulkifly, M. H. and Russly, A. R. 2010. *International Food Research Journal* 17: 127-135 (2010) Effect of heat treatment on the physico-chemical properties of starch from different botanical sources.
- [74] Cerniani, A., 1951. Thermal decomposition of starch. *Ann. Chim. (Rome)* 41. pp. 293–308.
- [75] Evans, R.B. and Wurzburg, O.B., 1967. Production and use of starch dextrin. In: Wistler, R.L., Paschall, E.F. (Eds.), *Starch: Chemistry and technology*. Academic Press, London. pp. 54–276.
- [76] Greenwood, C.T., 1967. The thermal degradation of starch. *Adv. Carbohydr. Chem.* 22. pp. 483–515.
- [77] Bello-Pérez, L.A., Romero-Manilla, R., and Paredes-López, O. 2000. Preparation and Properties of Physically Modified Banana Starch Prepared by Alcoholic-Alkaline Treatment. *Starch-Starke*. ResearchGate.
- [78] Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith, F. 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Anal. Chem.* 28. pp. 350–356.
- [79] Defloor, I., Dehing, I., & Delcour, J. A. 1998. Physico-chemical properties of cassava starch. *Starch/Starke*, 50. pp. 58–64.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (μm)						
	แป้ง ธรรมชาติ	170 °C		190 °C		210 °C	
		10 ชั่วโมง	20 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง	20 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง	20 ชั่วโมง
1	15.34	10.00	16.71	8.27	7.58	10.00	4.68
2	16.80	11.43	17.23	17.71	15.36	12.58	12.35
3	12.91	11.17	12.27	8.88	11.89	15.80	14.19
4	4.96	13.08	14.38	14.02	12.44	10.54	11.93
5	11.18	13.13	7.60	11.73	6.53	11.21	4.47
6	11.04	9.39	9.49	8.05	6.92	8.40	3.61
7	9.55	5.32	6.08	8.42	7.15	4.16	10.99
8	11.53	7.81	7.6	6.08	7.91	6.43	8.78
9	16.77	11.79	9.12	15.38	8.17	6.78	3.70
10	10.90	8.05	4.32	4.46	5.62	5.72	5.78
11	10.09	11.47	15.54	5.37	6.54	6.82	7.91
12	12.81	6.24	11.99	10.53	18.76	5.08	5.99
13	7.45	6.66	5.43	11.53	9.23	5.97	7.77
14	9.41	7.40	13.66	5.16	6.99	16.79	3.17
15	15.70	5.54	9.05	5.61	3.49	10.21	6.65
16	11.03	8.37	5.08	3.13	13.58	9.09	4.06
17	11.92	5.92	6.67	7.67	4.42	5.12	9.08
18	9.09	7.43	9.70	6.83	7.00	4.27	3.45
19	6.33	11.88	3.69	8.69	4.23	4.86	5.32
20	13.08	19.11	3.37	7.85	4.30	7.57	18.92
ค่าเฉลี่ย	11.39	9.56	9.42	8.77	8.41	8.37	7.64
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	3.22	3.40	4.39	3.77	4.03	3.65	4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของแป้งมันสำปะหลังในระบบ CIE ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

เวลา(ชั่วโมง)	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE)				
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	2.21	2.97	3.17	2.78	0.41
4	4.24	6.28	8.42	5.26	1.02
6	3.60	6.43	6.82	6.63	0.19
8	9.41	9.98	1.65	7.01	3.80
10	7.93	8.96	10.65	8.44	0.52
12	5.44	8.25	9.53	8.89	1.71
14	9.70	3.13	3.75	9.70	0
16	5.32	7.15	9.20	9.20	0
18	8.10	12.12	14.82	10.11	0.01
20	6.67	8.77	8.74	8.75	2.01

ตารางที่ ก.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของแป้งมันสำปะหลังในระบบ CIE ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

เวลา(ชั่วโมง)	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE)				
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	5.40	6.12	5.70	5.74	0.30
4	6.48	7.13	8.77	7.46	0.96
6	7.29	7.22	9.85	8.12	1.22
8	7.14	8.09	10.00	8.41	1.19
10	8.12	8.96	9.74	8.94	0.66
12	9.02	10.35	11.08	10.15	0.85
14	7.83	13.63	13.29	11.58	2.66
16	11.83	12.72	14.09	12.88	0.93
18	13.78	15.02	10.86	13.22	1.74
20	14.94	15.06	15.51	15.17	0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของแป้งมันสำปะหลังในระบบ CIE ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส

เวลา(ชั่วโมง)	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE)				
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	6.41	8.02	8.47	7.63	0.88
4	7.25	8.64	9.48	8.46	0.92
6	6.90	8.04	9.51	8.77	0.73
8	10.40	9.72	10.44	10.19	0.33
10	9.28	9.59	11.15	10.00	0.82
12	11.42	12.44	13.49	12.45	0.85
14	11.30	13.12	14.89	13.11	1.46
16	13.17	13.34	13.59	13.37	0.17
18	16.76	17.31	17.41	17.16	0.29
20	17.45	17.43	17.44	17.44	0.01

ตารางที่ ก.5 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ความหนืด (cP)						ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3	การทดลองครั้งที่ 4	การทดลองครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
0	3078	3075	3080	3087	3078	3041.5	93.5
2	2874	2872	2865	2850	2859	2864	27.8
4	2340	2334	2328	2325	2349	2335.3	37.4
6	1566	1560	1557	1560	1560	1560.6	100.3
8	720	708	714	712	705	711.8	6.6
10	596.5	590.5	589.5	589.5	588.5	590.9	17.0
12	418.5	419.5	415.5	417	416.5	417.4	6.6
14	326.5	327	326	324.5	324.5	325.7	24.1
16	290	286.5	289	284.5	286.5	287.3	27.1
18	247.5	249	249.5	249.5	249.5	249	3.4
20	148.8	148.5	147.3	147.9	147	147.9	0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ความหนืด (cP)						ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	การ ทดลอง ครั้งที่ 3	การ ทดลอง ครั้งที่ 4	การ ทดลอง ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
0	3078	3075	3080	3087	3078	3079.6	93.5
2	2736	2730	2730	2730	2730	2731.2	2.4
4	1773	1770	1764	1761	1758	1765.2	130.9
6	329.5	332	334.5	326	333.5	331.1	24.6
8	102.9	102.15	103.65	102.45	102	102.63	5.0
10	87.45	87.3	87.75	88.35	88.35	87.84	0.8
12	70.05	70.35	69.75	70.5	70.5	70.23	0.7
14	36.6	37.05	36.75	37.05	36.45	36.78	1.0
16	28.02	28.2	28.02	27.93	28.11	28.056	0.1
18	21.2	21.24	20.88	20.82	20.94	19.814	1.2
20	20.49	20.52	20.49	20.49	20.52	20.502	0.1

ตารางที่ ก.7 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ความหนืด (cP)						ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	การ ทดลอง ครั้งที่ 3	การ ทดลอง ครั้งที่ 4	การ ทดลอง ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
0	3078	3075	3080	3087	3078	3079.6	93.5
2	2271	2274	2277	2274	2277	2274.6	156.7
4	1302	1290	1296	1287	1290	1293	46.6
6	113.4	113.7	113.85	113.85	113.85	113.73	3.2
8	31.35	31.23	31.2	31.29	31.26	31.266	0.2
10	15.3	15.29	15.27	15.3	15.39	15.31	0.1
12	11.7	11.7	11.7	11.62	11.64	11.672	0.1
14	10.26	10.2	10.11	10.08	10.2	10.17	0.1
16	8.94	8.88	8.91	8.94	8.88	8.91	0.0
18	7.5	7.44	7.59	7.53	7.44	7.5	0.1
20	7.14	7.11	7.11	7.17	7.17	7.14	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากข้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ค่าการละลายของแอมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่
อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

เวลา(ชั่วโมง)	ค่าการละลาย (%)				
	การทดลอง ครั้งที่ 1	การทดลอง ครั้งที่ 2	การทดลอง ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0.42	1.26	0	0.56	0.64
2	0.00	3.67	9.52	4.40	3.92
4	15.45	7.48	-3.017	11.47	7.56
6	14.42	18.60	15.88	16.30	1.73
8	20.45	22.27	25.67	22.80	2.16
10	34.78	24.44	20.00	26.41	6.19
12	27.04	29.29	28.77	28.37	0.96
14	31.95	22.18	33.51	29.22	5.01
16	30.13	30.71	34.35	31.73	1.87
18	49.03	39.66	42.13	43.60	3.97
20	60.00	48.66	35.56	48.08	9.98

ตารางที่ ก.9 ค่าการละลายของแอมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่
อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

เวลา(ชั่วโมง)	ค่าการละลาย (%)				
	การทดลอง ครั้งที่ 1	การทดลอง ครั้งที่ 2	การทดลอง ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0.42	1.26	0	0.56	0.63
2	25.41	7.17	21.34	17.97	7.82
4	25.26	31.12	25.62	27.34	2.68
6	52.36	45.64	42.05	46.68	4.27
8	48.92	52.67	58.06	47.88	3.75
10	53.96	46.33	46.64	48.98	3.53
12	45.14	45.02	45.33	51.96	0.13
14	66.93	75.86	57.51	66.77	7.49
16	74.01	69.62	75.38	73.00	2.46
18	72.35	71.97	79.56	74.63	3.49
20	73.18	78.74	79.86	77.26	2.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 ค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่ อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส

เวลา(ชั่วโมง)	ค่าการละลาย (%)				
	การทดลอง ครั้งที่ 1	การทดลอง ครั้งที่ 2	การทดลอง ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0.42	1.26	0	0.56	0.64
2	25.79	22.70	21.40	23.30	1.84
4	41.01	39.37	30.86	37.08	4.45
6	56.99	37.07	46.98	47.01	8.13
8	68.09	60.00	66.67	64.92	3.52
10	65.67	77.17	78.87	73.90	5.86
12	81.55	80.29	80.33	80.72	0.59
14	82.30	81.62	93.60	85.84	5.50
16	76.62	90.98	91.06	86.22	12.75
18	96.60	99.54	82.74	92.96	7.33
20	94.04	96.89	100.45	97.13	2.62

ตารางที่ ก.11 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

เวลา(ชั่วโมง)	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (%Brix)				
	การทดลอง ครั้งที่ 1	การทดลอง ครั้งที่ 2	การทดลอง ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.12 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

เวลา(ชั่วโมง)	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (%Brix)				
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก.10 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส

เวลา(ชั่วโมง)	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (%Brix)				
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
10	1.3	1.1	1.2	1.2	0.08
12	3.5	3.6	3.5	3.53	0.05
14	4.9	4.9	4.8	4.87	0.05
16	4.8	5.1	5.1	5	0.14
18	5.5	5.5	5.4	5.47	0.05
20	5.6	5.6	5.6	5.6	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง

ปัจจัย B	ปัจจัย A				ค่ารวม	จำนวนรวม
	1	2	...	a		
1	A_1B_{11}	A_2B_{11}	...	A_aB_{11}	B_1	
	A_1B_{12}	A_2B_{12}	...	A_aB_{12}		
		
	A_1B_{1n}	A_2B_{1n}	...	A_aB_{1n}		
	T_{11}	T_{21}	...	T_{a1}		
2	A_1B_{21}	A_2B_{21}	...	A_aB_{21}	B_2	
	A_1B_{22}	A_2B_{22}	...	A_aB_{22}		
		
	A_1B_{2n}	A_2B_{2n}	...	A_aB_{2n}		
	T_{12}	T_{22}	...	T_{a2}		
...
B	A_1B_{b1}	A_2B_{b1}	...	A_aB_{b1}	B_b	
	A_1B_{b2}	A_2B_{b2}	...	A_aB_{b2}		
		
	A_1B_{bn}	A_2B_{bn}	...	A_aB_{bn}		
	T_{1b}	T_{2b}	...	T_{ab}		
ค่ารวม	A_1	A_2	...	A_a	T	
จำนวนรวม						N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่ง ความ แปรปรวน	Degree of freedom (df)	Sum of squares (SS)	Mean squares (MS)	F
A	a-1	$SSA = (A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_a^2) / bn - T^2 / N$	$MSA = SSA / (a-1)$	MSA / MSW
B	b-1	$SSB = (B_1^2 + B_2^2 + \dots + B_b^2) / an - T^2 / N$	$MSB = SSB / (b-1)$	MSB / MSW
AB	$(a-1)(b-1)$	$SSAB = (T_{11}^2 + T_{12}^2 + \dots + T_{ab}^2) / n - T^2 / N - SSA - SSB$	$MSAB = SSAB / (a-1)(b-1)$	$MSAB / MSW$
ภายใน เซลล์ (W)	$ab(n-1)$	$SSW = SST - SSA - SSB - SSAB$	$MSW = SSW / ab(n-1)$	
รวม (T)	N-1	$SST = (A_1B_{11}^2 + A_1B_{12}^2 + \dots + A_aB_{bn}^2) - T^2 / N$		

สมมติฐาน

Main effect

สำหรับปัจจัย A

$$H_0: \mu_{A1} = \mu_{A2} = \dots = \mu_{Ak}$$

H_a : not H_0 (มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อยคู่หนึ่งแตกต่างกัน)

สำหรับปัจจัย B

$$H_0: \mu_{B1} = \mu_{B2} = \dots = \mu_{Bk}$$

H_a : not H_0 (มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อยคู่หนึ่งแตกต่างกัน)

Interaction effect

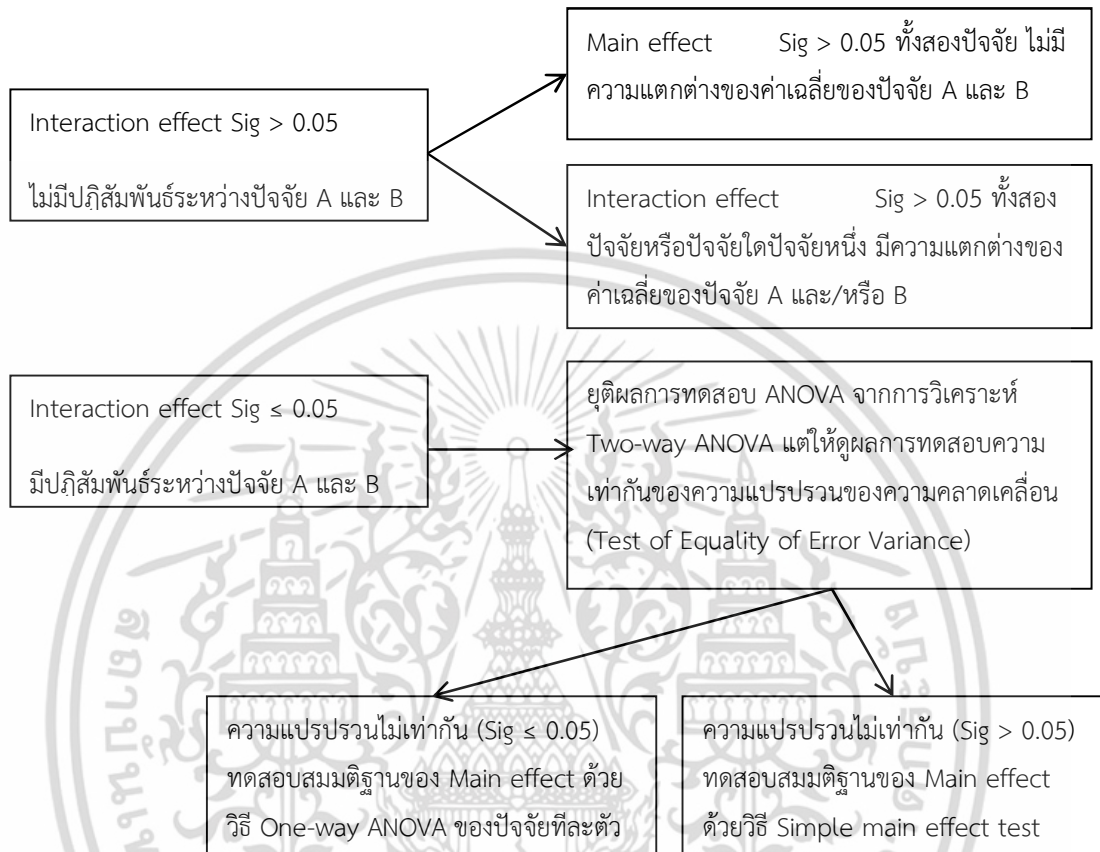
สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย A กับปัจจัย B

H_0 : ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย A กับปัจจัย B = 0 (ไม่มีปฏิสัมพันธ์)

H_a : ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย A กับปัจจัย B $\neq 0$ (มีปฏิสัมพันธ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางสำหรับการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง



ตาราง ข.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

จำนวนข้อมูล/ การทำซ้ำใน แต่ละกลุ่ม	กลุ่ม/การทดลองที่				
	1	2	...	k	
1	X_{11}	X_{21}	...	X_{k1}	
2	X_{12}	X_{22}	...	X_{k2}	
3	X_{13}	X_{23}	...	X_{k3}	
...	
N	X_{1n}	X_{2n}	...	X_{kn}	
ค่ารวม	T_1	T_2	...	T_k	T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ย	\bar{X}_1	\bar{X}_2	...	\bar{X}_k	\bar{X}
จำนวนรวม	n_1	n_2	...	n_k	$N=nk$

แหล่งความแปรปรวน	Degree of freedom (df)	Sum of squares (SS)	Mean squares (MS)	F
ระหว่างกลุ่ม (B)	k-1	$SSB = (T_1^2/n_1 + T_2^2/n_2 + \dots + T_k^2/n_k) - T^2/N$	$MSB = SSB/(k-1)$	MSB/MSW
ภายในกลุ่ม (W)	N-k	$SSW = (X_{11}^2 + X_{12}^2 + \dots + X_{kn}^2) - (T_1^2/n_1 + T_2^2/n_2 + \dots + T_k^2/n_k)$	$MSW = SSW/(N-k)$	
รวม (T)	N-1	$SST = (X_{11}^2 + X_{12}^2 + \dots + X_{kn}^2) - T^2/N$		

Duncan's new multiple range test (DMRT)

เป็นวิธีการทดสอบหาความแตกต่างโดยให้ความสำคัญกับจำนวนค่าเฉลี่ยในช่วงการเปรียบเทียบ (p) เมื่อมีการจัดเรียงค่าต่างๆ ตามลำดับในการคำนวณด้วย เหมาะสำหรับสิ่งทดลองจำนวนมาก

$$LSR_{\alpha,df,p} = \bar{X}_i - \bar{X}_j = (SSR_{\alpha,df,p})\sqrt{MSW/n}$$

โดย LSR = Least Significant Range
 SSR = ค่าจากตาราง Significant Studentized Ranges ที่ df ของ Within group คือ N-k และจำนวนค่าเฉลี่ยในช่วงการเปรียบเทียบ (p)
 MSW = ค่า Mean Square ภายในกลุ่มจากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน
 n = จำนวนตัวอย่าง

หากผลต่างของค่าเฉลี่ยคู่ใดมีค่ามากกว่าค่า LSR แสดงว่าค่าคู่เฉลี่ยคู่นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ α

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลกลางสถิติแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Factorial Designs (Factorial in CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (analysis of variance) ที่ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตาราง ข.3 ค่าการละลายของแป้งที่ได้รับความร้อน 170, 190 และ 210 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง

time (h)	170 °C				190 °C				210 °C				total (time)
	rep1	rep2	rep3	rep1+2+3	rep1	rep2	rep3	rep1+2+3	rep1	rep2	rep3	rep1+2+3	
0	0.42	1.26	0	1.68	0.42	1.26	0	1.68	0.42	1.26	0	1.68	5.04
2	0	3.67	9.52	13.19	25.41	7.17	21.34	53.92	25.79	22.7	21.4	69.89	137
4	15.45	7.48	-3.02	19.91	25.26	31.12	25.62	82	41.01	39.37	30.86	111.24	213.15
6	14.42	18.6	15.88	48.9	52.36	45.64	42.05	140.05	56.99	37.07	46.98	141.04	329.99
8	20.45	22.27	25.67	68.39	48.92	52.67	58.06	159.65	68.09	60	66.67	194.76	422.8
10	34.78	24.44	20	79.22	53.96	46.33	46.64	146.93	65.67	77.17	78.87	221.71	447.86
12	27.04	29.29	28.77	85.1	45.14	45.02	45.33	135.49	81.55	80.29	80.33	242.17	462.76
14	31.95	22.18	33.51	87.64	66.93	75.86	57.51	200.3	82.3	81.62	93.6	257.52	545.46
16	30.13	30.71	34.35	95.19	74.01	69.62	75.38	219.01	76.62	90.98	91.06	258.66	572.86
18	49.03	39.66	42.13	130.82	72.35	71.97	79.56	223.88	96.6	99.54	82.74	278.88	633.58
20	60	48.66	35.56	144.22	73.18	78.74	79.86	231.78	94.04	96.89	100.45	291.38	667.38
total (temp)	total	774.26			total	1594.69			total	2068.93			4437.88

การทดสอบสมมติฐานโดยการคำนวณ

$$dfA = a-1 = 3-1 = 2$$

$$dfB = b-1 = 11-1 = 10$$

$$dfAB = (a-1)(b-1) = 20$$

$$dfW = ab(n-1) = (3)(11)(3-1) = 66$$

$$dfT = N-1 = 99-1 = 98$$

$$SSA = (A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_a^2) / bn - T^2 / N = (774.26^2 + 1594.69^2 + 2068.93^2) / (11)(3) - 4437.88^2 / 99 = 26001.81$$

$$SSB = (B_1^2 + B_2^2 + \dots + B_b^2) / an - T^2 / N = (5.04^2 + 137^2 + \dots + 667.38^2) / (3)(3) - 4437.88^2 / 99 = 49854.04$$

$$SSAB = (T_{11}^2 + T_{12}^2 + \dots + T_{ab}^2) / n - T^2 / N - SSA - SSB = (1.68^2 + 13.9^2 + \dots + 291.38^2) / 3 - 4437.88^2 / 99 - 26001.81 - 49854.04 = 5601.86$$

$$SST = (A_1B_{11}^2 + A_1B_{12}^2 + \dots + A_aB_{bn}^2) - T^2 / N = (0.42^2 + 1.26^2 + \dots + 100.45^2) - 4437.88^2 / 99 = 83667.80$$

$$SSW = SST - SSA - SSB - SSAB = 2201.08$$

$$MSA = SSA / (a-1) = 13000.91$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$MSB = SSB/(b-1) = 4985.40$$

$$MSAB = SSAB/(a-1)(b-1) = 280.54$$

$$MSW = SSW/ab(n-1) = 33.35$$

$$F_A = MSA/MSW = 389.84$$

$$F_B = MSB/MSW = 149.49$$

$$F_{AB} = MSAB/MSW = 8.41$$

$$\text{ค่า } F \text{ จากตาราง} \quad F_{\alpha, df_A, df_W} = F_{0.05, 2, 66} = 3.14$$

$$F_{\alpha, df_B, df_W} = F_{0.05, 10, 66} = 1.98$$

$$F_{\alpha, df_{AB}, df_W} = F_{0.05, 20, 66} = 1.73$$

แหล่งความแปรปรวน	Degree of freedom (df)	Sum of squares (SS)	Mean squares (MS)	F
A	2	26001.81	13000.91	289.84
B	10	49854.04	4985.40	149.49
AB	20	5610.86	280.54	8.41
ภายในเซลล์ (W)	66	2201.08	33.35	
รวม (T)	98	83667.8		

ผลการทดสอบสมมติฐาน

$F_{\text{คำนวณ}} > F_{\text{ตาราง}}$ สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย A และ ปัจจัย B แสดงว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนที่ส่งผลต่อค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$) สรุปได้ว่ามีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนที่ส่งผลต่อค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลัง

$F_{\text{คำนวณ}} > F_{\text{ตาราง}}$ สำหรับปัจจัย A และปัจจัย B แสดงว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคืออุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$) สรุปได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนส่งผลต่อค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลัง

Interaction effect $\text{Sig} \leq 0.05$ มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย A และ B โดยที่ความแปรปรวนไม่เท่ากัน ($\text{Sig} \leq 0.05$) ทดสอบสมมติฐานของ Main effect ด้วยวิธี One-way ANOVA ของปัจจัยทีละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.4 ตารางแสดงค่าการละลายของแป้งที่ได้รับความร้อน 170 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง

time (h)	170 °C			
	rep1	rep2	rep3	ค่าเฉลี่ย
0	0.42	1.26	0	0.56
2	0	3.67	9.52	4.4
4	15.45	7.48	-3.02	6.64
6	14.42	18.6	15.88	16.3
8	20.45	22.27	25.67	22.8
10	34.78	24.44	20	26.41
12	27.04	29.29	28.77	28.37
14	31.95	22.18	33.51	29.21
16	30.13	30.71	34.35	31.73
18	49.03	39.66	42.13	43.61
20	60	48.66	35.56	48.07

แหล่งความแปรปรวน	Degree of freedom (df)	Sum of squares (SS)	Mean squares (MS)	F
ระหว่างกลุ่ม (B)	k-1	$SSB = (T_1^2/n_1 + T_2^2/n_2 + \dots + T_k^2/n_k) - T^2/N$	$MSB = SSB/(k-1)$	MSB/MSW
ภายในกลุ่ม (W)	N-k	$SSW = (X_{11}^2 + X_{12}^2 + \dots + X_{kn}^2) - (T_1^2/n_1 + T_2^2/n_2 + \dots + T_k^2/n_k)$	$MSW = SSW/(N-k)$	
รวม (T)	N-1	$SST = (X_{11}^2 + X_{12}^2 + \dots + X_{kn}^2) - T^2/N$		

$$df_B = k-1 = 11-1 = 10$$

$$df_W = N-k = (3)(11)-11 = 22$$

$$df_T = N-1 = 3(11)-1 = 32$$

$$SSB = (T_1^2/n_1 + T_2^2/n_2 + \dots + T_k^2/n_k) - T^2/N = (1.68^2 + 13.19^2 + \dots + 144.22^2)/3 - 774.26^2/33 = 7105.52$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SST = (X_{11}^2 + X_{12}^2 + \dots + X_{kn}^2) - T^2/N = (0.42^2 + 1.26^2 + \dots + 48.07^2) - 774.26^2/33 = 7897.16$$

$$SSW = SST - SSB = 791.64$$

$$MSB = SSB/dfB = 710.55$$

$$MSW = SSW/dfW = 35.98$$

$$F = MSB/MSW = 19.75$$

$$\text{ค่า } F \text{ จากตาราง} \quad F_{\alpha, dfB, dfW} = F_{0.05, 10, 22} = 2.30$$

แหล่งความแปรปรวน	Degree of freedom (df)	Sum of squares (SS)	Mean squares (MS)	F
ระหว่างกลุ่ม (B)	10	7105.52	710.55	19.75
ภายในกลุ่ม (W)	22	791.64	35.98	
รวม (T)	32	7897.16		

ผลการทดสอบสมมติฐาน

$F_{\text{คำนวณ}} > F_{\text{ตาราง}}$ แสดงว่าปฏิเสธ H_0 นั่นคือค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังอย่างน้อย 2 กลุ่มแตกต่างกัน สรุปได้ว่าเวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อค่าการละลายของแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ทำการทดสอบหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี DMRT

$$LSR_{\alpha, df, p} = \bar{X}_i - \bar{X}_j = (SSR_{\alpha, df, p}) \sqrt{MSW/n}$$

โดย	$SSR_{0.05, 22, 2}$	=	2.933
	$SSR_{0.05, 22, 3}$	=	3.080
	$SSR_{0.05, 22, 4}$	=	3.173
	$SSR_{0.05, 22, 5}$	=	3.239
	$SSR_{0.05, 22, 6}$	=	3.288
	$SSR_{0.05, 22, 7}$	=	3.326
	$SSR_{0.05, 22, 8}$	=	3.355
	$SSR_{0.05, 22, 9}$	=	3.379
	$SSR_{0.05, 22, 10}$	=	3.398
	$SSR_{0.05, 22, 11}$	=	3.414
	MSW	=	35.98
	n	=	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$LSR_{0.05,22,2} = (SSR_{0.05,22,2}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 10.16$$

$$LSR_{0.05,22,3} = (SSR_{0.05,22,3}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 10.66$$

$$LSR_{0.05,22,4} = (SSR_{0.05,22,4}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 10.98$$

$$LSR_{0.05,22,5} = (SSR_{0.05,22,5}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 11.21$$

$$LSR_{0.05,22,6} = (SSR_{0.05,22,6}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 11.38$$

$$LSR_{0.05,22,7} = (SSR_{0.05,22,7}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 11.52$$

$$LSR_{0.05,22,8} = (SSR_{0.05,22,8}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 11.62$$

$$LSR_{0.05,22,9} = (SSR_{0.05,22,9}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 11.70$$

$$LSR_{0.05,22,10} = (SSR_{0.05,22,10}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 11.76$$

$$LSR_{0.05,22,11} = (SSR_{0.05,22,11}) \sqrt{\frac{3.98}{3}} = 11.82$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑.5 คำนัยสำคัญของความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแต่ละคู่กับค่า LSR

	20 h 48.07	18 h 43.61	16 h 31.73	14 h 29.21	12 h 28.37	10 h 26.41	8 h 22.8	6 h 16.3	4 h 6.64	2 h 4.4
0 h 0.56	47.51*	43.05*	31.17*	28.65*	27.81*	25.85*	22.24*	15.74*	6.08 ^{ns}	3.84 ^{ns}
2 h 4.4	43.68*	39.21*	27.33*	24.82*	23.97*	22.01*	18.4*	11.9*	2.24 ^{ns}	
4 h 6.64	41.44*	36.97*	25.09*	22.58*	21.73*	19.77*	16.16*	9.66 ^{ns}		
6 h 16.3	31.77*	27.31*	15.43*	12.91*	12.07*	10.11 ^{ns}	6.5 ^{ns}			
8 h 22.8	25.28*	20.81*	8.93 ^{ns}	6.42 ^{ns}	5.57 ^{ns}	3.61 ^{ns}				
10 h 26.41	21.67*	17.2*	5.32 ^{ns}	2.81 ^{ns}	1.96 ^{ns}					
12 h 28.37	19.71*	15.24*	3.36 ^{ns}	0.85 ^{ns}						
14 h 29.21	18.86*	14.39*	2.52 ^{ns}							
16 h 31.73	16.34*	11.88*								
18 h 43.61	4.47 ^{ns}									

แสดงผลได้เป็น 48.07a 43.61a 31.73b 29.21b 28.37b 26.41bc 22.8bc 16.3cd 6.64de
4.4e 0.56e

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พีรภัทร อุไรเวช และ ประสสินต์ ชุ่มใจหาญ. 2559. อิทธิพลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด ต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการผลิตเดกซ์ทรีน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อิทธิพลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการผลิตเดกซ์ทริน Effect of Infrared Heat Treatment on Properties of Tapioca Starch during Dextrin Production

พีรภัทร อุไรเวศ¹, ประสันต์ ชุ่มใจหาญ^{1*}

Peerapat Uraives¹, Prasan Choomjaihan^{1*}

¹หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 10520

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

*Corresponding author: Tel: +66-2-329-8337, E-mail: prasan.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

เดกซ์ทรินเป็นแป้งดัดแปรชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้านทั้งการผลิตอาหาร สิ่งทอ กระดาษ กาว เป็นต้น ซึ่งการผลิตเดกซ์ทรินทำได้โดยการไฮโดรไลซ์แป้งด้วยเอนไซม์ กรด หรือการให้ความร้อนแห้งที่อุณหภูมิสูงโดยการได้ประยุกต์ใช้ความร้อนจากการนำและพาความร้อนเป็นหลัก แต่ยังไม่พบงานวิจัยใดที่มีการประยุกต์ใช้หลักการให้ความร้อนกับแป้งมันสำปะหลังเพื่อผลิตเดกซ์ทรินโดยวิธีการแผ่รังสี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่ได้รับความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดระหว่างการผลิตเดกซ์ทริน โดยสมบัติที่มุ่งเน้นการศึกษาได้แก่ความหนืด ค่าการละลาย ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และโครงสร้างทางกายภาพของเม็ดแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรดที่ระดับอุณหภูมิ 170, 190 และ 210°C เป็นเวลา 20 h เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเดกซ์ทริน โดยแป้งมันสำปะหลังมีความชื้นเริ่มต้น 12.17%db จากการศึกษาการลักษณะทางกายภาพของเม็ดแป้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแป้งเล็กลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ความหนืดของแป้งลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ในขณะที่ค่าการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแห้ง จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนต่างกันที่เวลาเดียวกันความหนืดและค่าการละลายมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดและค่าการละลายมากที่สุด ผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในสารละลายแป้งพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะสามารถวัดค่าได้เมื่อทำการให้ความร้อนแห้งด้วยอุณหภูมิ 210°C เป็นเวลานานกว่า 8 h และมีค่าเพิ่มสูงสุดเมื่อผ่านไป 18 h

คำสำคัญ: อินฟราเรด, แป้งมันสำปะหลัง, เดกซ์ทริน

Abstract

Dextrin is one type of modified starch. Dextrin has been widely used in various processes, such as, food, textile, paper, glue and so on. Dextrin was produced from hydrolyzed starch by enzymes, acid or heating at high temperature. However, there have been not many researches work on the heating by radiation heat transfer. Therefore, the aim of this research was to monitor the properties of Tapioca starch during Dextrin production by infrared radiation including viscosity, solubility, total soluble solid and structure of starch granules. Tapioca starch samples were heated by infrared heater at 170, 190 and 210°C for 20 h and were monitored the change of their properties. The initial moisture of Tapioca starch was 12.17%db. The results showed that, increasing of the heating temperature and time decreased the viscosity and average diameter of starch granules, while increased the solubility of starch. The viscosity, solubility and average diameter of starch granules of different heating temperature were significantly different ($p < 0.05$). Total soluble solid was able to be measured when the heating time was longer than 8 h with heating temperature of 210°C and the its maximum value was about 18 h.

Keywords: Infrared, Tapioca starch, Dextrin

1 บทนำ

มันสำปะหลัง (Tapioca) จัดเป็นพืชอยู่ในตระกูล Euphobiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz. (William et al., 2009) มันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างหลากหลายโดยส่วนมากมันสำปะหลังถูกนำไปผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้ในการอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อาหาร สิ่งทอ กระดาษ และกาว เป็นต้น (William et al., 2009) ประเทศไทยส่งออกแป้งมันสำปะหลังสูงเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยมีมูลค่าการส่งออกกว่า 63,000 ล้านบาท แป้งเป็นการส่งออกแป้งตัดแปรร 21,000 ล้านบาท (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2558)

เดกซ์ทริน (dextrin) ถือว่าเป็นแป้งตัดแปรรชนิดหนึ่งที่ได้จากการไฮโดรไลซ์แป้งบางส่วนด้วยเอนไซม์ กรด ความร้อน หรือกรดร่วมกับความร้อน โดยมีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 30 μm (นิธิยา, 2557) โดยทั่วไปเดกซ์ทรินแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ เดกซ์ทรินขาว (white dextrin), เดกซ์ทรินเหลือง (yellow dextrin) และบริติชกัม (British gums) ซึ่งการผลิตเดกซ์ทรินแต่ละประเภทนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยพื้นฐานแล้วการผลิตเดกซ์ทรินทำได้โดยการให้ความร้อนแก่แป้ง (heat treatment) เป็นเวลา 10 ถึง 20 h โดยวิธีการคั่วหรือผ่านตัวกลางในการนำความร้อนเช่น เกลียว (extrusion) และล้างแลกเปลี่ยนความร้อนในลักษณะการกวน (vat dryer) ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200°C ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เช่น โซดาไฟ (caustic soda) และบอแรกซ์ (borax) โดยที่การผลิตเดกซ์ทรินขาวใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา การผลิตเดกซ์ทรินเหลืองใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าเดกซ์ทรินขาว สำหรับการผลิตบริติชกัมใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการ สีของเดกซ์ทรินที่ได้รับหลังการให้ความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน โดยเมื่อเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับแป้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สีของเดกซ์ทรินมีความเป็นสีเหลืองจนถึงน้ำตาลเข้มมากขึ้น (Radley, 1976)

สมบัติทั่วไปของเดกซ์ทรินคือ มีความหนืดน้อยกว่าแป้งละลายได้ในน้ำเย็น มีความสามารถในการจับตัวเป็นก้อน คุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ดี และมีความข้นหนืด (Radley, 1976) ทำให้เดกซ์ทรินถูกนำไปใช้ในการผลิตเป็นส่วนประกอบของอาหารและผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เช่น เพื่อผสมเป็นส่วนประกอบของยาเม็ดเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันดีขึ้นของส่วนผสมต่างๆ เพื่อการผลิตบรรจุภัณฑ์จากกระดาษ เพื่อการผลิตกาวติดแสตมป์ เพื่อการผลิตสิ่งทอ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เพื่อผลิตสีน้ำ และเพื่อผลิตดอกไม้ไฟ เป็นต้น

รังสีอินฟราเรดเป็นการเหนี่ยวนำความร้อนรูปแบบหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถสร้างคลื่นความร้อนที่ความยาวคลื่นประมาณ 0.76 μm – 1 mm ในลักษณะการแพร่รังสีสู่

วัตถุชีวภาพและวัตถุทางการเกษตร (ฤทธิชัย, 2554) รังสีอินฟราเรดถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการแปรรูปและเป็นกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตรอย่างแพร่หลาย (Hanamaka et al., 2006) ที่มีการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มกลิ่น รส ที่ดีขึ้น เช่นในอุตสาหกรรมเบเกอรี่ และการอบแห้งวัตถุดิบทางการเกษตร และพืชสมุนไพร เพื่อช่วยเร่งสารสำคัญในการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดกับการให้ความร้อนโดยการนำและการพาความร้อน พบว่าการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการให้ความร้อนการนำและการพาความร้อน (Nowak and Leweciki, 2004) นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนสั้นกว่า การให้ความร้อนมีความสม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนสูง อุปกรณ์ที่ใช้งานมีความเรียบง่ายและประหยัดพลังงานมากกว่า (Krishnamurthy et al., 2009) ซึ่งโดยทั่วไปการให้ความร้อนในการผลิตเดกซ์ทรินจะใช้อุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน เช่น หม้อหรือเกลียวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ใช้น้ำมันหรือไอน้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Radley, 1976)

ในปัจจุบันการผลิตเดกซ์ทรินโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดยังไม่เป็นที่แพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อที่จะทำการทดสอบสมบัติของเดกซ์ทรินที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดกับแป้งมันสำปะหลังได้แก่ โครงสร้างของเม็ดแป้ง ความหนืด ค่าการละลาย และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ เนื่องจากสมบัติเหล่านี้เป็นตัวชี้วัดในการนำเดกซ์ทรินไปใช้ในงานที่แตกต่างกัน การศึกษาดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตเดกซ์ทรินและออกแบบการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังจากโรงงานแป้งมันไทยทำ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย ดำเนินวิเคราะห์หาความเข้มข้นเริ่มต้นมาตรฐาน (AOAC, 2010) จำนวน 50 ตัวอย่าง พบว่ามีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 12.17±0.15%db

2.2 การให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังด้วยรังสีอินฟราเรด

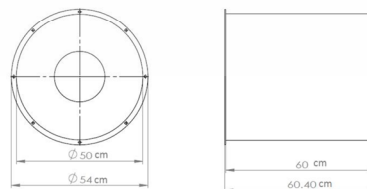


Figure 1 Cylindrical chamber for starch heat treatment

อุปกรณ์ในการให้ความร้อนแก่แป้งมันสำปะหลังสำหรับในการทดลองครั้งนี้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเฉพาะเพื่อใช้ในการทดลอง มีลักษณะเป็นถังสเตนเลสทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 m ความยาว 0.6 m วางในแนวขนานกับพื้นหมุนโดยใช้มอเตอร์ขนาด 24 V ให้ความร้อนแก่แป้งมันสำปะหลังปริมาณ 5 kg ด้วยหลอดรังสีอินฟราเรดกำลังไฟ 850 W จำนวน 2 หลอด สามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนได้โดยตัวต้านทาน (Potentiometer) และปรับกำลังไฟในการแผ่รังสีอินฟราเรดด้วยกล่องควบคุมกระแสไฟ ความหนาของแป้งมันสำปะหลัง 5 kg ประมาณ 8 cm ในถังทรงกระบอก ทำการพลิกกลับ 1 รอบทุกๆ 5 min ที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 210°C ตามลำดับ และทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อนำมาหาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังทุกๆ 2 h โดยให้ความร้อนแก่แป้งมันสำปะหลังเป็นเวลาทั้งหมด 20 h

2.3 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้ง

การศึกษาโครงสร้างและความเสียหายของเม็ดแป้งศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยการสุ่มตัวอย่างจากนั้นนำไปเคลือบทองเพื่อให้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าด้วยเครื่อง Polaron Emitech (Quorum Technologies Ltd., SC7640, Laughton, UK) จากนั้นนำตัวอย่างไปตรวจสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (Carl Zeiss Co., EVO MA10, Oberkochen, Germany) ระดับกำลังขยาย 1,000 เท่า ค่าความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) 20 kV

2.4 การหาค่าความหนืด

วิธีการหาความหนืดได้ดัดแปลงวิธีการของ Bello-Perez et al. (2000) โดยทำละลายสตาร์ช 25 g ในน้ำกลั่น 500 ml นำไปให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเจลาติไนเซชันในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 min โดยมีคนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 25°C วัดความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Rotational Viscometer (Brookfield, DV-E, Middleboro, USA) ที่ความเร็ว 100 rpm โดยใช้หัววัดหมายเลข s61 ถึง s64

2.5 การหาค่าการละลาย

วิธีการหาค่าการละลายทำโดยอ้างอิงวิธีการของ Dubois et al. (1956) โดยเตรียมแป้งประมาณ 0.02 g (w_1) ทำเป็นสารละลายแป้ง 1% (w/v) นำไปแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 min จากนั้นปล่อยให้สารละลายเย็นตัวลงและนำสารละลายเทลงในหลอดหยั่งขนาด 2 ml ที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่อง Microcentrifuge (Labnet, Spectrafuge 7M, Mayfield, USA) ที่ระดับ 5000×g เป็นเวลา 30 min จากนั้นดูดของเหลวตอนบนใส่ภาชนะที่ทราบน้ำหนักแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 4 h แล้วนำไปชั่งน้ำหนักได้เป็นส่วนของแป้งที่ละลายน้ำ

ได้ (w_2) จากนั้นนำน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณค่าการละลายดังที่แสดงในสมการที่ 1

$$\text{ค่าการละลาย (\%)} = \frac{w_2}{w_1} \times 100 \quad (1)$$

2.6 การหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

วิธีการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำทำการทดสอบโดยอ้างอิงวิธีการของ Sarifudin and Assiry (2014) โดยใช้สารละลายแป้ง 10% (w/v) จากนั้นทดสอบโดยใช้ Pocket Refractometer (Atago, Model PAL-1, Tokyo, Japan) โดยค่าที่ได้มีหน่วยเป็น %Brix

2.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การทดลองนี้ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Designs (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว One-Way ANOVA (analysis of variance) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้ง

ภาพถ่ายแสดงรูปร่างและความเสียหายของเม็ดแป้งธรรมชาติและแป้งที่ได้รับความร้อนแสดงในรูปที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแป้งธรรมชาติมีค่าเท่ากับ $11.39 \pm 3.22 \mu\text{m}$ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Defloor et al. (1998) ที่รายงานว่าขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 9.5 ถึง $13.6 \mu\text{m}$ โดยมีรูปร่างเป็นทรงรีและทรงกลมขนาดเล็ก จากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy) พบว่าแป้งมีพื้นผิวเรียบและมีรอยแยกเล็กน้อย เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนพื้นผิวของแป้งมีพื้นผิวหยาบขึ้นและเกิดรอยแยกจากความร้อน โดยที่รอยแตกและการแยกกันของเม็ดแป้งมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อน อาจเป็นเพราะแป้งสูญเสียความชื้นภายในเม็ดแป้งจึงทำให้เกิดการหดตัวและเกิดรอยแตกบริเวณพื้นผิวดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อน แป้งจึงมีลักษณะการหดตัวและมีรอยแตกเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Katz (1934) รายงานว่าการให้ความร้อนแก่แป้งสาลีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120°C ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนที่แป้งมันสำปะหลังสามารถดูดซับพลังงานความร้อนมากกว่า 210°C จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดความเสียหายในลักษณะที่ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลเล็กลงเนื่องจากสลายตัวของพันธะเม็ดแป้ง (Thermal reaction) และผลของการได้รับอุณหภูมิสูงมากเกินไปส่งผลให้คาร์โบไฮเดรตในเม็ดแป้งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

(Caramelization) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพของเม็ดแป้ง เมื่อได้รับคลื่นความร้อนจากรังสีอินฟราเรดมากกว่าเกินไปส่งผลให้เม็ดแป้งมีขนาดลดลง เนื่องจากความร้อนส่วนเกินที่มากกว่าจะทำให้เกิดทำลายพันธะของโซ่ยาวของเม็ดแป้งให้สั้นลง โดยค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลแป้งลดลงเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนดังที่แสดงในตารางที่ 1

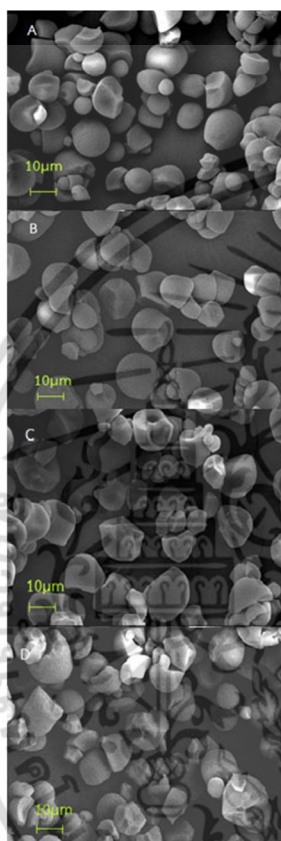


Figure 2 (A) Natural starch, (B) Heated starch at 170°C for 20 h, (C) Heated starch at 190°C for 20 h และ (D) Heated starch at 210°C for 20 h

3.2 ผลการศึกษาความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้ง เมื่อแป้งได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลถูกทำลาย โดยที่การพองตัวนั้นจะให้น้ำบริเวณรอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งจึงเคลื่อนที่ได้ยากทำให้เกิดความหนืดขึ้น (Zobel and Stephen, 1995)

Table 1 Average diameter of tapioca starch under IR heated for 10 and 20 h

	เวลา (h)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)
แป้งธรรมชาติ*	-	11.39 \pm 3.22 ^a
170°C	10	9.56 \pm 3.40 ^{ab}
	20	9.42 \pm 4.40 ^{ab}
190°C	10	8.77 \pm 3.77 ^b
	20	8.41 \pm 4.03 ^b
210°C	10	8.37 \pm 3.65 ^b
	20	7.64 \pm 4.22 ^b

อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ในคอลัมน์

* แป้งธรรมชาติคือแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ

การศึกษาความหนืดของสารละลายแป้งได้ทำการวัดค่าความหนืดของแป้งที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดทุกๆ 2 h เป็นเวลา 20 h ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยที่ความหนืดเริ่มต้นของแป้งมีค่าเท่ากับ 3,079.6 \pm 93.5 cP ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3 และตารางที่ 2

Table 2 Viscosity value of heated tapioca starch under IR heating

เวลา (h)	ความหนืด (cP)		
	170°C	190°C	210°C
0	3079.6 \pm 93.5 ^a	3079.6 \pm 93.5 ^a	3079.6 \pm 93.5 ^a
2	2864.0 \pm 27.8 ^b	2731.2 \pm 2.40 ^b	2274.6 \pm 157 ^b
4	2335.3 \pm 37.4 ^c	1765.2 \pm 131 ^c	1293.0 \pm 46.6 ^c
6	1560.6 \pm 100 ^d	3311.0 \pm 24.6 ^d	113.7 \pm 3.20 ^d
8	711.8 \pm 6.60 ^e	102.6 \pm 5.00 ^e	31.3 \pm 0.20 ^e
10	590.9 \pm 17.0 ^f	87.8 \pm 0.80 ^e	15.3 \pm 0.10 ^e
12	417.4 \pm 6.60 ^g	70.2 \pm 0.70 ^{ef}	11.7 \pm 0.10 ^e
14	325.7 \pm 24.1 ^g	36.8 \pm 1.10 ^f	10.2 \pm 0.10 ^e
16	287.3 \pm 27.1 ^{gh}	28.1 \pm 0.10 ^f	8.9 \pm 0.10 ^e
18	249.0 \pm 3.40 ^h	21.0 \pm 1.20 ^f	7.5 \pm 0.10 ^e
20	147.9 \pm 0.70 ⁱ	20.5 \pm 0.10 ^f	7.1 \pm 0.10 ^e

อักษรด้านล่างและด้านบนที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ในแถวและคอลัมน์ตามลำดับ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อนแป้งส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลงที่ทุกอุณหภูมิ การให้ความร้อน โดยการลดลงของความหนืดของแป้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าสูงกว่ามีค่าที่เร็วกว่าในช่วงแรก หลังจากนั้นค่าความหนืดเริ่มมีค่าคงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อให้ความร้อนกับแป้งที่ระดับอุณหภูมิ 190 และ 210°C หลังจากผ่าน 6 h เป็นต้นไป สำหรับที่อุณหภูมิต่ำ 170°C ค่าความหนืดมีลักษณะการ

เปลี่ยนแปลงตามเวลาการให้ความร้อนเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 190 และ 210°C แต่เมื่อผ่าน 8 h ไปแล้วนั้นอัตราการการลดลงของความหนืดมีค่าลดลงตามเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น

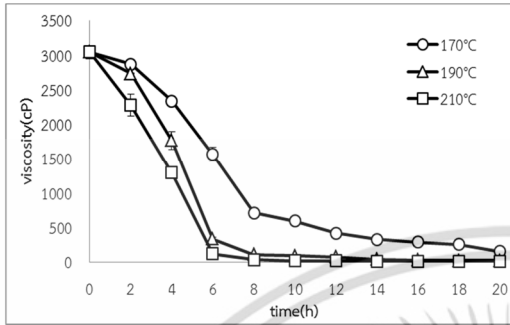


Figure 3 Changing of viscosity of heated tapioca starch under IR heating versus heating time.

ความหนืดที่ลดลงเกิดจากโมเลกุลของแป้งมีขนาดเล็กลงเมื่อแป้งได้รับความร้อน ทำให้เมื่อแป้งพองตัวจะดูดซับน้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งได้น้อยส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลง (Zobel and Stephen, 1995) นอกจากนี้ยังมีรายงานของ อโนชา และคณะ (2555) ที่ได้ทำการตัดแปรแป้งข้าวเหนียวด้วยรังสีไมโครเวฟในการให้ความร้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งดีขึ้น โดยแป้งข้าวเหนียวตัดแปรสารถ้วยไมโครเวฟมีคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปร โดยมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิด เจลาทีไนเซชัน และค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น แต่ค่าพารามิเตอร์ด้านความหนืดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวปกติ

3.3 ผลการศึกษาค่าการละลาย

รูปที่ 4 แสดงผลการศึกษาการละลายของสารละลายแป้งได้ทำการทดสอบค่าการละลายของแป้งที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดทุกๆ 2 h เป็นเวลา 20 h ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยที่ค่าการละลายเริ่มต้นของแป้งมีค่าเท่ากับ 0.56±0.63% ผลการศึกษาค่าการละลายของแป้งที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 210°C เป็นเวลา 20 h พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่แป้ง ส่งผลให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนส่งผลให้พันธะของแป้งถูกทำลาย ส่งผลให้ความยาวของพันธะสั้นลง ทำให้แป้งละลายน้ำได้ดีขึ้น (Harper, 1992) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Noranizan et al. (2010) ได้ทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแป้งสาลี, แป้งสาชู, แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง ที่อุณหภูมิ 100, 110 และ 120°C เป็นเวลา 1 และ 2 h พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนส่งผลให้กำลังการพองตัวและค่าการละลายเพิ่มขึ้น โดยผลการ

ทดสอบค่าการละลายและความแตกต่างทางสถิติได้แสดงในตารางที่ 3 โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายกับเวลาในการให้ความร้อนแป้งแสดงในรูปที่ 4

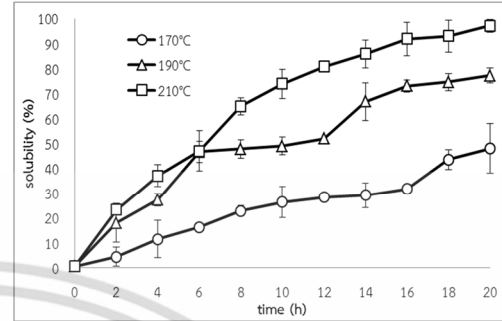


Figure 4 Changing of solubility of heated tapioca starch under IR heating versus heating time.

Table 3 Solubility value of heated tapioca starch under IR heating

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการละลาย (%)		
	170°C	190°C	210°C
0	0.56±0.63 ^e	0.56±0.63 ^e	0.56±0.63 ^g
2	4.40±3.92 ^e	17.97±7.82 ^e	23.30±1.84 ^f
4	11.47±7.56 ^{da}	27.34±2.68 ^d	37.08±4.45 ^e
6	16.30±1.73 ^{cd}	46.68±4.27 ^c	47.01±8.13 ^d
8	22.80±2.16 ^{bc}	47.88±3.75 ^c	64.92±3.52 ^d
10	26.41±6.19 ^b	48.98±3.52 ^c	73.90±5.86 ^{cd}
12	28.37±0.96 ^b	51.96±0.12 ^c	80.72±0.58 ^{bc}
14	29.22±5.01 ^b	66.77±7.49 ^b	85.84±5.49 ^{abc}
16	31.73±1.87 ^b	73.00±2.46 ^{ab}	91.81±12.75 ^{ab}
18	43.60±3.97 ^a	74.63±3.48 ^{ab}	92.96±7.32 ^{ab}
20	48.08±9.98 ^a	77.26±2.92 ^a	97.13±2.62 ^a

อักษรระดับล่างและด้านบนที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ (p<0.05) ในแถวและคอลัมน์ตามลำดับ

Table 4 Total soluble solids value of heated tapioca starch under IR heating

เวลา (h)	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (%)
	210°C
8	-
10	1.20 ± 0.08 ^f
12	3.53 ± 0.05 ^e
14	4.87 ± 0.05 ^d
16	5.00 ± 0.14 ^c
18	5.47 ± 0.05 ^b
20	5.60 ± 0.00 ^a

อีกพระดำนล่างและด้านบนที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ในแถวและคอลัมน์ตามลำดับ

3.4 ผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

รูปที่ 5 และตารางที่ 4 เป็นผลการศึกษาหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยเมื่อแป้งที่ได้รับความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดทุกๆ 2 h เป็นเวลา 20 h ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 0 %Brix ผลการศึกษาค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 210°C เป็นเวลา 20 h พบว่าการให้ความร้อนที่ 210°C เป็นเวลามากกว่า 8 h จึงจะส่งผลให้แป้งเกิดของแข็งที่ละลายน้ำได้และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อน เนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่สามารถไฮโดรไลซ์โมเลกุลของพันธะไฮโดรเจนของแป้งได้ (Harper, 1992) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแป้งจึงแสดงผลเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน

ผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แตกต่างจากผลการศึกษาค่าการละลายเนื่องจากการทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เป็นการทดสอบโดยใช้น้ำอุณหภูมิปกติในขณะที่การทดสอบค่าการละลายเป็นการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้ง ดังนั้นผลการศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จึงเป็นการบ่งบอกปริมาณของแข็งหรือองค์ประกอบของแป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Katz (1934) ที่ได้ทำการให้ความร้อนแป้งสาลีที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่อให้ความร้อนแป้งสาลีที่อุณหภูมิสูงกว่า 180°C ส่งผลให้ความสามารถในการละลายในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น ในขณะที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายในน้ำเย็น

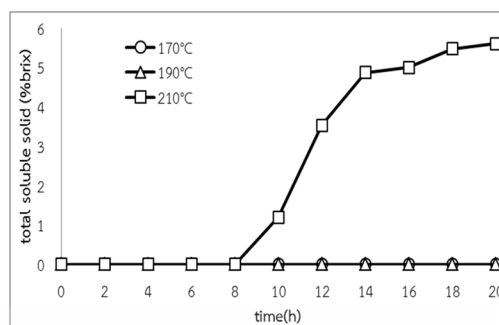


Figure 5 Changing of total soluble solids of heated tapioca starch under IR heating versus heating time.

4 สรุป

จากการทดลองให้ความร้อนแป้งมันสำปะหลังโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 210°C ส่งผลให้ความหนืดลดลงมากที่สุด สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าการละลายผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็กที่สุด ในขณะที่ค่าการละลายเพิ่มขึ้นมากที่สุดเช่นกัน ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สามารถวัดค่าได้เมื่อทำการให้ความร้อนแป้งที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลามากกว่า 10 h ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเดกซ์ทรินมากที่สุดที่เวลามากกว่า 10 h โดยผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นศักยภาพของการใช้รังสีอินฟราเรดในการให้ความร้อนเพื่อผลิตเดกซ์ทรินจากแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้รับไปต่อยอดในการผลิตเดกซ์ทรินจากแป้งมันสำปะหลังในระดับอุตสาหกรรม

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาคีวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์และสถานที่สำหรับการทดลอง

6 เอกสารอ้างอิง

- นิธิยา รัตนาปนนท์. 2557 เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ กรุงเทพฯ.
สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย. 2558. สถิติส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย กรุงเทพฯ. แหล่งข้อมูล: <http://www.thaitaplocastarch.org>. เข้าถึงเมื่อ 4 เมษายน 2558.
อนิชา สุขสมบูรณ์, พัลลภ ไพพงษ์, กรกช หล่อโลหการ, กิตติญาณ เขียวเชิงคำ, มนต์ราม อินทรศิริ, อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. การใช้ประโยชน์จากข้าว. นิตยสารการงานวิจัย บนเส้นทางงานวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ปี 2550 งานเกษตรแฟร์ ประจำปี 2550. กรุงเทพฯ: ภาควิชา

- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรม
เกษตร , มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Bello-Pérez, L.A., Romero-Manilla, R., Paredes-López,
O. 2000. Preparation and Properties of Physically
Modified Banana Starch Prepared by Alcoholic
Alkaline Treatment. *Starch-Starke*. 52(5), 154-159.
- Defloor, I., Dehing, I., Delcour, J.A. 1998. Physico-
chemical properties of cassava starch.
Starch/Starke 50, 58-64.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A.,
Smith, F. 1956. Colorimetric Method for
Determination of Sugars and Related
Substances. *Analytical Chemistry*. 28(3), 350-356.
- Hanamaka, D., Furuse, T., Han, W., Tanaka, S. 2006.
Effect of the wavelength of infrared heaters on
inactivation of bacterial spores at various water
activities. *International Journal of Food
Microbiology* 108(2), 281-285.
- Harper, J. 1992. Extrusion processing of starch. In:
Alexander, R.J., Zobel, H.F. (Eds.), *Developments
in Carbohydrate Chemistry*. American Association
of Cereal Chemists, USA.
- ICUMSA 2009. International Commission for Uniform
Methods of Sugar Analysis - The Determination of
Refractometric Dry Substance (RDS%) of
Molasses Accepted and Very Pure Syrups (Liquid
Sugars), Thick Juice and Run-off Syrups-Methods
Book GS4/3/8-13. Peterborough-UK.
- Katz, J.R. 1934. Dextrin (British gum) formed by
heating dry starch. *Rec.Trav. Chim* 53, 555-560.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554. เทคโนโลยีการสร้างความร้อนด้วย
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่ง
ประเทศไทย 17(1), 41-52.
- Krishnamurthy, K., Khurana, H.K., Jun, S., Irudayaraj J.,
Demirci, A. 2009. Food Processing Operations
Modeling: Design and Analysis. In Jun, S. and
Irudayaraj, J.M. (Eds.), *Food Science and
Technology Series*, (2nd ed.) Boca Raton, FL: CRC
Press, 13-142.
- AOAC. 2010. Official Methods of Analysis. (18th ed.).
Association of Official Analytical Chemists,
Washington, D.C.: USA.
- Noranizan, M.A., Dzulkifly, M.H., Russly, A.R. 2010.
Effect of heat treatment on the physico-chemical
properties of starch from different botanical
sources. *International Food Research Journal* 17,
127-135.
- Radley, J.A. 1976. *Industrial Uses of Starch and its
Derivatives*. Springer Science & Business Media.
- Sarifudin, A., Assiry A. 2014. Some physicochemical
properties of dextrin produced by extrusion
process. *Journal of the Saudi Society of
Agricultural Sciences*. 13, 100-106.
- William, F.B., Kuakoon, P., Klanarong, S. 2009.
Tapioca/Cassava Starch: Production and Use.
Starch. Chemistry and Technology. (3rd ed.).
- Zobel, F.Z., Stephen, A.M. 1995. Starch: structure,
analysis and application. In: A. M., Stephen (Eds.),
Food polysaccharides and their application (pp.
19-66). New York: Taylor & Francis.



วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
Thai Society of Agricultural Engineering Journal

กองบรรณาธิการ วสภท.

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
1 หมู่ 6 ถ.มาลัยแมน ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140
โทรศัพท์/โทรสาร 0-3435-1896

18 เมษายน 2559

เรื่อง แจ้งตอบรับตีพิมพ์ต้นฉบับบทความ
เรียน ผศ. ดร. ประสันต์ ชุ่มใจหาญ

ตามที่ท่านได้ส่งต้นฉบับบทความเรื่อง “อิทธิพลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมบัติของ
แป้งมันสำปะหลังระหว่างการผลิตเดกซ์ทรีน” เพื่อเสนอตีพิมพ์ในวารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
โดยผ่านการประเมินความเหมาะสมในทางวิชาการ และปรับปรุงแก้ไขตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ แล้วนั้น

บัดนี้ กองบรรณาธิการพิจารณาแล้ว เห็นสมควรให้ต้นฉบับบทความดังกล่าวได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ใน
วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2559

กองบรรณาธิการจะแจ้งชำระค่าธรรมเนียมตีพิมพ์ตามระเบียบสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ต่อไป ท่านสามารถสอบถามข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่บรรณาธิการ วสภท. ผศ. ดร. วัชรพล ชยประเสริฐ ทาง e-mail:
fengwpc@ku.ac.th หรือ ทางโทรศัพท์: 086-996-1653

ขอแสดงความนับถือ

(ผศ. ดร. วัชรพล ชยประเสริฐ)

บรรณาธิการ วสภท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพีรภัทร อุไรเวศ
วัน เดือน ปีเกิด	20 ตุลาคม 2535 ที่ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	684/2 พัฒนาการ 38 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10240
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี (พ.ศ.2554-2558) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเกษตรสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail	peerapat.uraives@gmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้